

ICS 27.180

P 61

备案号: J2649—2019

NB

中华人民共和国能源行业标准

P

NB/T 10107—2018

海上风电场工程岩土试验规程

Specification for Geotechnical Tests of Offshore
Wind Power Projects

2018 – 12 – 25 发布

2019 – 05 – 01 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国能源行业标准

海上风电场工程岩土试验规程

Specification for Geotechnical Tests of
Offshore Wind Power Projects
NB/T 10107—2018

主编部门：水电水利规划设计总院

批准部门：国 家 能 源 局

施行日期：2 0 1 9 年 5 月 1 日

中国水利水电出版社

2019 北 京

国家能源局 公 告

2018 年 第 16 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52号）有关规定，经审查，国家能源局批准《光伏发电工程地质勘察规范》等204项行业标准，其中能源标准（NB）32项、电力标准（DL）172项，现予以发布。

附件：行业标准目录

国家能源局

2018年12月25日

NB/T 10107—2018

附件：

行 业 标 准 目 录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
...						
8	NB/T 10107— 2018	海上风电场工程 岩土试验规程			2018-12-25	2019-05-01
...						

前 言

根据《国家能源局关于下达 2014 年第二批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2015〕12 号）的要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程的主要技术内容是：试样制备与饱和、土的物理性质试验、土的力学性质试验、原位测试、水质分析、土质分析、黏土矿物分析、海底浅层气及含气土试验、岩石物理力学性质试验。

本规程由国家能源局负责管理，由水电水利规划设计总院提出并负责日常管理，由能源行业风电标准化技术委员会风电场规划设计分技术委员会负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送水电水利规划设计总院（地址：北京市西城区六铺炕北小街 2 号，邮编：100120）。

本规程主编单位：中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

本规程参编单位：浙江华东建设工程有限公司
浙江华东工程安全技术有限公司
河海大学
长江水利委员会长江科学院
武汉大学
南京大学
中国科学院武汉岩土力学研究所

本规程主要起草人员：汪明元 单治钢 饶锡保 黄 斌
徐高峰 沈 扬 王宽君 李欣益
胡胜刚 左永振 杨 涛 王 勇
王振红 周跃峰 周力沛 朱小彩

程武伟	徐学勇	王艳丽	狄圣杰
杜文博	卜令方	徐 晗	张 昆
陈 云	熊 潇	孙森军	郇彩云
本规程主要审查人员：王惠明	李文纲	钟建平	李小泉
敖大华	杨守华	冯蓓蕾	来向华
黄斌彩	路新景	刘艳华	王 栋
王亚军	李 墨	秦卫锋	朴 苓
李仕胜			

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	5
4	试样制备与饱和	6
4.1	一般规定	6
4.2	试样制备	6
4.3	试样饱和	15
5	土的物理性质试验	19
5.1	含水率试验	19
5.2	密度试验	19
5.3	颗粒分析试验	19
5.4	界限含水率试验	20
5.5	土粒比重试验	20
5.6	相对密度试验	20
5.7	击实试验	20
5.8	导热系数试验	21
5.9	比表面积试验	24
6	土的力学性质试验	25
6.1	固结试验	25
6.2	直接剪切试验	32
6.3	残余强度试验	35
6.4	土与钢管桩界面特性试验	39
6.5	渗透试验	41

6.6	三轴压缩试验	42
6.7	无侧限抗压强度试验	51
6.8	三轴蠕变试验	51
6.9	真三轴试验	53
6.10	振动三轴试验	59
6.11	动单剪试验	65
6.12	共振柱试验	69
6.13	空心圆柱动扭剪试验	75
6.14	微型十字板剪切试验	83
6.15	袖珍贯入仪试验	84
7	原位测试	87
7.1	静力触探试验	87
7.2	T形触探试验	95
7.3	球形触探试验	97
7.4	十字板剪切试验	99
7.5	标准贯入试验	101
7.6	动力触探试验	103
7.7	旁压试验	104
7.8	扁铲侧胀试验	109
7.9	现场载荷试验	113
7.10	现场直剪试验	113
7.11	钻孔弹模试验	113
7.12	波速测试	117
7.13	电阻率测试	122
8	水质分析	126
8.1	pH 值测定	126
8.2	钙、镁离子测定	130
8.3	氯离子测定	130
8.4	硫酸根离子测定	133

8.5	游离二氧化碳测定	134
8.6	侵蚀性二氧化碳测定	134
8.7	铵离子测定	134
8.8	碱度测定	135
8.9	钾、钠离子测定	135
8.10	总矿化度测定	136
8.11	硫酸盐还原菌测定	136
9	土质分析	139
9.1	pH 值测定	139
9.2	易溶盐化学成分分析	140
9.3	土质全量化学成分分析	141
9.4	氧化还原电位测定	147
9.5	腐蚀电流密度测定	148
9.6	有机质试验	149
10	黏土矿物分析	155
10.1	X 射线衍射分析	155
10.2	差热分析	155
10.3	扫描电镜分析	156
11	海底浅层气及含气土试验	158
11.1	海底浅层气测试	158
11.2	海底含气土力学性质试验	161
12	岩石物理力学性质试验	163
12.1	含水率试验	163
12.2	吸水性试验	163
12.3	颗粒密度试验	163
12.4	块体密度试验	163
12.5	膨胀性试验	164
12.6	单轴抗压强度试验	164
12.7	单轴压缩变形试验	165

NB/T 10107—2018

12.8 直剪试验	168
12.9 点荷载强度试验	171
附录 A 海上风电场工程岩土物理力学性质指标试验方法	172
附录 B 试样要求与管理	176
附录 C 试验记录表	179
附录 D 空心圆柱动扭剪试验的参数计算	208
附录 E 扫描电镜法黏土矿物鉴定标准	212
本规程用词说明	214
引用标准名录	215
附：条文说明	217

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	3
3	Basic Requirements	5
4	Preparation and Saturation of Specimen	6
4.1	General Requirements	6
4.2	Specimen Preparation	6
4.3	Specimen Saturation	15
5	Physical Property Tests of Soil	19
5.1	Water Content Test	19
5.2	Density Test	19
5.3	Grain Size Analysis Test	19
5.4	Atterberg Limit Test	20
5.5	Specific Gravity Test of Soil Grain	20
5.6	Relative Density Test	20
5.7	Compaction Test	20
5.8	Thermal Conductivity Test	21
5.9	Specific Surface Test	24
6	Mechanical Property Test of Soil	25
6.1	One - Dimensional Compression Test	25
6.2	Direct Shear Test	32
6.3	Residual Shear Strength Test	35
6.4	Soil - Steel Pile Interface Behaviour Test	39
6.5	Permeability Test	41

NB/T 10107—2018

6.6	Triaxial Compression Test	42
6.7	Unconfined Compressive Strength Test	51
6.8	Triaxial Creep Test	51
6.9	True Triaxial Test	53
6.10	Dynamic Triaxial Test	59
6.11	Dynamic Simple Shear Test	65
6.12	Resonant Column Test	69
6.13	Hollow Cylinder Dynamic Torsional Shear Test	75
6.14	Miniature Vane Shear Test	83
6.15	Pocket Penetrometer Test	84
7	In - Situ Tests	87
7.1	Cone Penetration Test	87
7.2	T - bar Penetration Test	95
7.3	Ball Penetration Test	97
7.4	Vane Shear Test	99
7.5	Standard Penetration Test	101
7.6	Dynamic Penetration Test	103
7.7	Pressuremeter Test	104
7.8	Flat Dilatometer Test	109
7.9	In - Situ Loading Test	113
7.10	In - Situ Direct Shear Test	113
7.11	Borehole Jack Test	113
7.12	Wave Velocity Test	117
7.13	Resistivity Test	122
8	Water Quality Analysis	126
8.1	pH Value	126
8.2	Calcium Ion and Magnesium Ion	130
8.3	Chlorion Ion	130
8.4	Sulfate Ion	133

8.5	Free Carbon Dioxide	134
8.6	Corrosive Carbon Dioxide	134
8.7	Ammonium Ion	134
8.8	Alkalinity	135
8.9	Potassium Ion and Sodium Ion	135
8.10	Total Salinity	136
8.11	Sulfate Reducing Bacteria	136
9	Soil Quality Analysis	139
9.1	pH Value	139
9.2	Chemical Composition of Soluble Salt	140
9.3	Chemical Composition of Soil	141
9.4	Oxidation – Reduction Potential	147
9.5	Corrosion Current Density	148
9.6	Organic Matter Test	149
10	Clay Minerals Analysis	155
10.1	X – ray Diffraction Analysis	155
10.2	Differential Thermal Analysis	155
10.3	Scanning Electron Microscopy Analysis	156
11	Submarine Shallow Gas and Gassy Soil Tests	158
11.1	Submarine Shallow Gas Test	158
11.2	Mechanical Property Test of Submarine Gassy Soil	161
12	Physical and Mechanical Property Tests of Rock	163
12.1	Water Content Test	163
12.2	Water Absorption Test	163
12.3	Grain Density Test	163
12.4	Bulk Density Test	163
12.5	Swelling Test	164
12.6	Uniaxial Compressive Strength Test	164
12.7	Uniaxial Compressive Deformability Test	165

NB/T 10107—2018

12.8	Direct Shear Strength Test	168
12.9	Point – Load Strength Test	171
Appendix A	Test Methods for Physical and Mechanical Indexes of Rock and Soil in Offshore Wind Power Projects	172
Appendix B	Requirements and Managements of Soil Samples	176
Appendix C	Test Record Forms	179
Appendix D	Parameter Calculation for Hollow Cylinder Dynamic Torsional Shear Test	208
Appendix E	Identification Standard for Clay Minerals by SEM	212
	Explanation of Wording in This Specification	214
	List of Quoted Standards	215
	Addition: Explanation of Provisions	217

1 总 则

1.0.1 为规范海上风电场工程岩土试验的工作内容和技术要求，保证试验工作质量和成果质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于海上风电场工程的岩土试验。

1.0.3 海上风电场工程岩土试验，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 导热系数 thermal conductivity

单位温度梯度下，单位时间内通过单位面积土体的热量。

2.1.2 环剪试验 ring shear test

对环形试样进行扭转剪切，保持试样剪切面积不变、法向应力恒定的大位移剪切试验。

2.1.3 土与钢管桩界面特性试验 soil - steel pile interface behaviour test

对土与钢管桩的接触面，施加一定的法向应力，使界面沿切向产生剪切位移，以确定界面剪应力与剪切位移的关系以及界面强度曲线的试验。

2.1.4 三轴蠕变试验 triaxial creep test

在一定围压下分级或分别施加轴向压力，维持荷载恒定，测定试样的轴向应变与体积应变随时间变化的三轴压缩试验。

2.1.5 真三轴试验 true triaxial test

受三个相互独立的主应力作用的三轴压缩试验。

2.1.6 空心圆柱动扭剪试验 hollow cylinder dynamic torsional shear test

在一定的侧向压力下，对空心圆柱试样同步施加一定变化规律的轴力和扭矩，测定相应应力路径下试样的动应力-应变关系、动强度、动剪切模量、动弹性模量和阻尼比等性质的试验。

2.1.7 微型十字板剪切试验 miniature vane shear test

将一定规格的微型十字板板头垂直表面压入土体中，以一定的扭转速率剪切，测定饱和软黏土不排水抗剪强度的试验。

2.1.8 T形触探试验 T-bar penetration test

将T形探头按规定的速率贯入土中，同时测记贯入过程中探头抗力的一种全流动贯入式静力触探试验。

2.1.9 球形触探试验 ball penetration test

将球形探头按规定的速率贯入土中，同时测记贯入过程中探头抗力的一种全流动贯入式静力触探试验。

2.1.10 含气土 gassy soil

含有压力高于大气压的封闭气体的海底沉积物。

2.1.11 海底浅层气 submarine shallow gas

在海底浅部沉积物中聚集的主要由甲烷、二氧化碳、硫化氢、乙烷组成的气体。

2.2 符 号**2.2.1 尺寸和时间**

N —— 振动次数；

V —— 试样体积；

ω —— 圆频率。

2.2.2 物理性指标

C_u —— 不均匀系数；

D_r —— 相对密度；

e —— 孔隙比；

G_s —— 土粒比重；

I_L —— 液性指数；

I_P —— 塑性指数；

m —— 试样质量；

S_r —— 饱和度；

w —— 含水率；

w_L —— 液限；

w_P —— 塑限；

ρ_d ——土的干密度。

2.2.3 力学性指标

a_v ——压缩系数；

B_q ——静探孔压系数；

C_s ——回弹指数；

C_v ——固结系数；

C_α ——次固结系数；

E_e ——回弹模量；

E_s ——压缩模量；

E_0 ——变形模量；

E_{se} ——不排水割线模量；

f_s ——静力触探侧摩阻力；

G_d ——动剪切模量；

K_0 ——静止侧压力系数；

m_v ——体积压缩系数；

p_c ——先期固结压力；

p_s ——比贯入阻力；

q_c ——锥尖阻力；

q_u ——无侧限抗压强度；

S_t ——灵敏度；

u ——孔隙水压力；

V_p ——压缩波波速；

V_s ——剪切波波速；

ϵ_{50} ——不固结不排水剪试验达到 50% 峰值主应力差时对应的轴向应变。

3 基本规定

3.0.1 海上风电场工程岩土试验应根据场地地质条件和设计要求确定。

3.0.2 海上风电场工程岩土的分类应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

3.0.3 海上风电场工程岩土物理力学性质指标试验方法宜按本规程附录 A 的规定选用，试样要求与管理应符合本规程附录 B 的规定。室内试验的试样质量等级要求和不同等级试样的取样方法应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

3.0.4 岩土试验数据整理与统计分析应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

3.0.5 岩土试验所用的仪器设备应符合现行国家标准《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 的相关规定，并应进行检定或校准、校验。

3.0.6 应定期或试验前对仪器设备的传感器进行标定，使用中出現异常应重新标定。标定时所用的传感器、导线和测量仪器应与试验时相同。

3.0.7 化学分析应采用国家有证标准物质进行量值溯源。

3.0.8 岩土试验弃样应放置和环境行政主管部门规定的位置，不得随意倾倒和堆放。

3.0.9 原位测试前，应根据现场条件制定保障设备和人员安全的专门措施。

3.0.10 除特殊要求外试验用水均应为纯水。

4 试样制备与饱和

4.1 一般规定

4.1.1 制备试样的颗粒粒径不宜大于 20mm，颗粒粒径大于 20mm 的试样制备应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的相关规定。

4.1.2 宜多制备 1 个或 2 个试样备用。同一组原状土样的密度最大允许差值不宜大于 $0.03\text{g}/\text{cm}^3$ ，含水率最大允许差值不宜大于 2%。同一组扰动土制备试样的密度与制备标准的允许差值不宜大于 $0.02\text{g}/\text{cm}^3$ ，含水率与制备标准的允许差值不宜大于 1%。

4.2 试样制备

4.2.1 原状土固结试验、直剪试验、渗透试验的试样制备应符合下列规定：

1 应先按土样筒标明的上下方向放置，开启后检查土样结构，当确定土样已受到严重扰动或取土质量不符合规定时，不应制备原状土试样。应进一步辨别土样上下层次，整平土样两端。

2 应将试验用的切土环刀内壁涂一薄层凡士林，刃口向下放在土样上。用切土刀将土样切削成稍大于环刀直径的土柱。然后将环刀垂直向下压，边压边削，至土样伸出环刀为止，试样与环刀应密合。削去两端余土并修平。擦净环刀外壁，称环刀和土总质量，准确至 0.1g。

3 切削过程中应细心观察土样的情况，并描述土样的层次、气味、颜色，同时记录土样有无杂质、土质是否均匀、有无裂缝等情况。

4 切取试样后剩余的原状土样，宜用蜡纸包好置于保湿器内，以备补做试验之用；切削的代表性余土可做物理性试验。

5 视试样性质和试验要求，决定试样是否需要饱和，当不立即进行试验或饱和时，应将试样暂存于保湿器。

4.2.2 原状土无侧限抗压强度试验、三轴压缩试验、三轴蠕变试验、振动三轴试验、共振柱试验试样制备应符合下列规定：

1 试样高度与直径之比应为 2.0~2.5，当试样直径小于或等于 100mm 时，土体允许最大粒径为试样直径的 1/10；当试样直径大于 100mm 时，土体允许最大粒径为试样直径的 1/5。

2 应先按土样筒标明的上下方向放置，开启后检查土样结构，当确定土样已受严重扰动或取土质量不符合规定时，不应制备原状土试样。

3 对于较软的土样，应先用钢丝锯或削土刀切取一稍大于规定尺寸的土柱，放在切土盘的上、下圆盘之间。再用钢丝锯或削土刀紧靠侧板，由上往下切削，边切削边转动圆盘，直至土样的直径达到规定值。按试样高度的要求，削平上下两端。

4 对于较硬的土样，应先用削土刀或钢丝锯切取一稍大于规定尺寸的土柱，上、下两端削平，按试样要求的层次方向，放在切土架上，用切土器切削。先在切土器刀口内壁涂上一薄层油，将切土器的刀口对准土样顶面，边削土边压切土器，直至切削到比要求的试样约高 2cm 为止，然后拆开切土器，取出试样，按要求的高度将两端削平。

5 试样的两端面应平整，互相平行，上下均匀，侧面垂直于端面。在切样过程中，对试样表面因遇砾石而成的孔洞，可用切削下的余土填补。

6 将切削好的试样称量，直径大于 100mm 的试样应准确至 1.0g；直径小于或等于 100mm 的试样应准确至 0.1g。取切下的余土，平行测定含水率，试验不应少于两组，含水率差值应符合本规程第 4.1.2 条的要求。

4.2.3 扰动细粒土试样制备应符合下列规定：

1 对扰动土样应描述其颜色、土类、气味及夹杂物。可将扰动土充分拌匀，取代表性土样测定含水率。

2 将块状扰动土放在橡皮板上用木碾或碎土器碾散，不应压碎颗粒；当含水率较大时，可先风干至易碾散为止。

3 将碾散后的土样过筛。当试样直径小于或等于 100mm 时，土体允许最大粒径为试样直径的 1/10；当试样直径大于 100mm 时，土体允许最大粒径为试样直径的 1/5。

4 过筛后用四分对角取样法或分砂器，取出足够数量的代表性试样装入玻璃缸内，试样应有标签。对风干土，应测定风干含水率。

5 根据模具的容积及所要求的干密度和含水率，计算风干土与制样所需水的用量。将需加的水量喷洒到土料上拌匀，稍静置后装入塑料袋，然后置于密闭容器内至少 20h，使含水率均匀。取出土料复测其含水率，含水率宜满足本规程第 4.1.2 条的要求。

6 将湿土倒入模具内，并固定在底板上的击实器内。对于三轴压缩试验、振动三轴试验、共振柱试验的试样，宜按试样高度分层击实，粉土分 3 层～5 层，黏性土分 5 层～8 层击实。对于固结试验、直接剪切试验、渗透试验的试样，不宜分层击实。将击样筒中的试样两端整平，取出称其质量。

注：根据现行国家标准《土的工程分类标准》GB/T 50145，细粒土是指小于 0.075mm 的颗粒含量不小于 50% 的土。

4.2.4 扰动砂土试样制备应符合下列规定：

1 三轴压缩试验、振动三轴试验、共振柱试验的试样制备应按下列步骤进行：

- 1) 将土样过筛，当试样直径小于或等于 100mm 时，土体允许最大粒径为试样直径的 1/10；当试样直径大于 100mm 时，土体允许最大粒径为试样直径的

1/5。

- 2) 根据试验要求的试样干密度和试样体积称取所需风干砂样质量，分三等份，在水中煮沸，冷却后待用。
 - 3) 开孔隙水压力阀及量管阀，使压力室底座充水。将煮沸过的透水板滑入压力室底座上，并用橡皮带包扎，应防止砂土漏入底座中。关闭孔隙水压力阀及量管阀，将橡皮膜的一端套在压力室底座上并扎紧，将对开模套在底座上，将橡皮膜的上端翻出，然后抽气，使橡皮膜贴紧对开模内壁。
 - 4) 在橡皮膜内注无气水约达试样高的 1/3。用长柄小勺将煮沸冷却的一份砂样装入膜中，填至该层要求高度。对含有细粒土和要求干密度较高的试样，可采用干砂制备，用水头饱和或反压饱和。
 - 5) 第 1 层砂样填完后，继续注水至试样高度的 2/3，再装第 2 层砂样。如此继续装样，直至模内装满为止。当要求干密度较大，可在填砂过程中轻轻敲打对开模，使所称出的砂样填满规定的体积。然后放上透水板、试样帽，翻起橡皮膜，并扎紧在试样帽上。
 - 6) 打开量管阀降低量管，使管内水面低于试样中心高程以下约 0.2m，当试样直径为 101mm 时，应低于试样中心高程以下约 0.5m。在试样内产生一定负压，使试样能站立。拆除对开模，测量试样高度与直径，复核试样干密度。
- 2 固结试验、直接剪切试验试样制备应按下列步骤进行：
- 1) 取过 2mm 筛孔的代表性风干砂样 1200g 备用。按要求的干密度称每个试样所需风干砂量，准确至 0.1g。

- 2) 直接剪切试验时, 对准上下盒, 插入固定销, 将洁净的透水板或不透水板放入剪切盒内。
- 3) 将准备好的砂样倒入剪力盒或固结容器的环刀内, 抚平表面, 放上硬木块, 用手轻轻敲打, 使试样达到要求的干密度。

4.2.5 环剪试验试样制备应符合下列规定:

1 将扰动的土样用纯水浸泡 24h 后调制均匀, 制备成液限状态的土膏, 将其填入限制环内。

2 装填时, 先沿限制环四周填入, 然后填中部, 应排除试样内的气体。

3 将试样顶部刮平至与试样盒上表面平齐。

4.2.6 真三轴试验试样制备应符合下列规定:

1 试样宜采用长方体样或立方体样, 上下、前后、左右的六个面应平整, 对立面应互相平行、侧面垂直。试样高度与最短边长之比应为 2.0~2.5, 当试样最短边长小于或等于 100mm 时, 土体允许最大粒径为试样最短边长的 1/10; 当试样最短边长大于 100mm 时, 土体允许最大粒径为试样直径的 1/5。

2 原状土试样的制备应采用方形切土器, 具体操作按本规程第 4.2.2 条执行。

3 扰动细粒土试样制备应符合本规程第 4.2.3 条规定, 扰动砂土试样制备应符合本规程第 4.2.4 条规定。

4.2.7 动单剪试验试样制备应符合下列规定:

1 试样宜为圆柱形或方形, 要求上下面平整、平行。试样最小直径或横向尺寸应大于 45mm, 试样高度与直径或最小横向尺寸之比应小于 0.4, 试样横截面积宜为 $20\text{cm}^2 \sim 80\text{cm}^2$ 。试样允许的最大颗粒粒径宜为试样高度的 1/10。

2 原状土样制备应符合本规程第 4.2.1 条规定。

3 扰动细粒土试样制备应符合本规程第 4.2.3 条规定。

4 扰动砂土试样制备应符合本规程第 4.2.4 条规定, 填装

层数不宜少于 3 层。

4.2.8 原状黏性土空心圆柱试样制备步骤宜符合下列要求：

1 将试样置于黏性土空心圆柱试样切样台，并使试样固定，宜用钢丝锯切削外壁，待外壁成形后，用刮刀对外壁修光处理。

2 内壁切削前宜在成形的试样外壁包裹一层保鲜膜和对开圆模，完成试样的整体保护后再切削内壁。

3 内壁切削可采用黏性土空心圆柱试样内壁切削器，切削器与土接触处应先均匀涂抹凡士林，切削过程中应避免损坏内壁。

4 取出初步成形的空心圆柱试样，将其放入与试样外径和高度相一致的标准尺寸的外壁承膜筒中，用钢丝锯将试样上下端部削平。

4.2.9 扰动黏性土空心圆柱试样制备步骤宜符合下列规定：

1 现场取土后，宜经过风干、碾碎、过筛，获得较为干燥的均质土，并测定风干土含水率。

2 可采用真空负压制备装置制作扰动黏性土空心圆柱试样。每批真空负压试样制备过程中配置参数宜保持一致，试样宜按下列要求制备：

- 1) 取过筛后土样，根据设计加水量配制设计含水率的泥浆，宜用搅拌机均匀搅拌至少 10min。
- 2) 将搅拌好的泥浆缓慢倒入制样装置内，同时振荡泥浆，直至泥浆中无气泡为止。
- 3) 向各制样筒内倒入等质量的泥浆，装好泥浆后宜将试样密封。
- 4) 连接真空负压制备装置与真空泵，可采用分级加载的方式施加小于试验固结压力的真空负压。
- 5) 量测水气分离装置中的排水量，宜实时监测并控制最终扰动土样的含水率。
- 6) 当含水率达到目标含水率时，宜缓慢降低装置内的

真空负压，卸荷至 0kPa 之后，制备装置宜静置至少 30min。

7) 试样静置完毕可拆除制备装置，过程中不宜扰动试样。

3 扰动黏性土空心圆柱试样内、外壁精削宜按本规程第 4.2.8 条执行。

4.2.10 扰动粉土和砂土空心圆柱试样制备应符合下列规定：

1 干法制样宜按下列步骤进行：

- 1) 安装制样装置，可采用扰动无黏性土空心圆柱试样成样装置。先将内膜底部牢固嵌入基座，注入无气水，通过挤压检查内膜表面是否渗水，若有渗水卸下重新安装。将透水板穿过内膜固定在基座上，并贴上环形滤纸。将外膜底部套入基座并扎紧。安装内膜后在其内侧安装内壁模具，安装外膜后在其外侧安装外壁模具，并分别调整内、外膜，使其紧密贴合内、外壁模具。
- 2) 根据要求的干密度，称量所需质量的干土，平均分成 5 份~8 份，分层填筑、击实。每一层填筑时将干土均匀注入模具中，刮平，用扰动无黏性土空心圆柱试样击实器进行击实，击实过程中宜及时测量击实后的填土高度，满足控制要求时停止击实，待刮毛后填筑下一层土样。
- 3) 填筑最后一层土样前在试样外壁模具上套上制样护筒，再填筑、击实最后一层土样。
- 4) 完成击实后拆除护筒，在试样顶端安放环形滤纸，安装试样顶盖，避免对试样产生竖向扰动。将外膜翻上顶盖外壁并扎紧，将内膜穿过顶盖内壁向外翻出并扎紧。
- 5) 将反压下排水口与无气水缸相连，反压上排水口与

过气留水缸连通，过气留水缸再与真空泵连通。开启真空泵，吸出试样中的气体，无气水缸中的无气水则从反压下排水口进入试样。待试样内部形成一定负压后，停止抽气，拆除内壁模具，向内腔注满无气水。

6) 安装帽盖，将螺栓拧紧固定。

2 湿法制样应按下列步骤进行：

1) 宜按本规程第 4.2.9 条第 1 款的规定测定风干土的含水率。

2) 计算加水量，将水喷洒到土料上，应搅拌均匀并静置。

3) 将土样置于密闭容器内至少 24h，之后取出土料复测含水率，最大允许差值应为 $\pm 1\%$ 。

4) 其余步骤宜同干法制样。

4.2.11 含气砂土试样制备应符合下列规定：

1 试样的高度 h 与直径 D 之比可采用 2.0~2.5。

2 根据试验要求的试样干密度和试样体积，称取所需质量的烘干砂样，分三等份。

3 根据现场原位水压条件预设三轴试验的反压值。

4 恒温条件下使用溶气仪，分别在溶气仪的两个溶气反应釜中各充入一半容积的无气水，将二氧化碳气源通入溶气仪，釜内气压力设定为三轴仪预设的反压值，制备饱和二氧化碳的溶气水，溶解反应时间不宜少于 12h；溶解过程中，气源与溶气反应釜间保持连通，开启溶气仪中的磁搅拌装置。饱和二氧化碳的溶气水制备完成，切断气源，停止搅拌，关闭溶气反应釜所有阀门，待试验备用。

5 在应力路径三轴仪上，宜按本规程第 4.2.4 条规定制备所需干密度的砂土扰动试样。

4.2.12 腐蚀性评价的土样及水样采集与准备应符合下列规定：

1 根据土质分析、水质分析所需土样量、水样量和对容器材质的要求，选择合适容积和材质的采样器，并洗净。

2 现场取样时，应采用现场水清洗采样器不少于三次。

3 当土样、水样与空气接触易发生性质变化时，应采取密闭取样与存样。

4 当土样、水样随环境温度发生性质变化时，应对样品采用温度控制措施。

4.2.13 岩石单轴抗压、压缩变形试验的试件可采用钻孔岩芯或岩块，试件制备应符合下列规定：

1 圆柱体试件直径宜为 48mm~54mm。

2 试件直径应大于岩石中最大颗粒直径的 10 倍。

3 试件高度与直径之比宜为 2.0~2.5。

4 试件两端面不平行度误差不应大于 0.05mm。

5 沿试件高度，直径的误差不应大于 0.3mm。

6 端面应垂直于试件轴线，偏差不应大于 0.25°。

7 试样在采取、运输和制备过程中，应避免产生裂缝。

8 试件的含水状态，可根据需要选择天然含水状态、烘干状态、饱和状态或其他含水状态。

4.2.14 岩石直剪试件应符合下列规定：

1 试样应在现场采取，在采取、运输、储存和制备过程中，应防止产生裂隙和扰动。

2 岩石直剪试验试件的直径或边长不应小于 50mm，试件高度宜与直径或边长相等。

3 岩石结构面直剪试验试件的直径或边长不应小于 50mm，试件高度宜与直径或边长相等。结构面应位于试件中部。

4 混凝土与岩石接触面直剪试验试件宜为正方体，其边长不宜小于 150mm。接触面应位于试件中部，浇筑前岩石接触面的起伏差宜为边长的 1%~2%。混凝土应按预定的配合比浇筑，骨料的最大粒径不应大于边长的 1/6。

5 试验的含水状态可根据需要选择天然含水状态、饱和状态或其他含水状态。

4.3 试样饱和

4.3.1 试样的饱和方法宜根据土的性质和饱和度选择，并应符合下列规定：

1 砂土试样可直接在仪器内浸水饱和或水头饱和。

2 渗透系数大于 10^{-4} cm/s 的细粒土，固结试验、直接剪切试验试样宜采用毛管法饱和。

3 渗透系数不大于 10^{-4} cm/s 的细粒土，固结试验、直接剪切试验试样宜采用真空饱和法。

4 细粒土的三轴压缩试验、三轴蠕变试验、真三轴试验、振动三轴试验、动单剪试验和共振柱试验的试样宜采用真空饱和法或反压饱和法。

4.3.2 三轴压缩试验的砂土试样水头饱和操作步骤应符合下列规定：

1 安装好试样，试样顶用透水帽，试样周围不应贴滤纸条。

2 宜施加 20kPa 的围压，并同时提高试样底部量管的水面和降低连接试样顶部固结排水管的水平面，使两管水面差在 1m 左右。

3 打开量管阀、孔隙水压力阀和排水阀，使水自下而上通过试样，直至同一时间间隔内量管流出的水量与固结排水管内水量相等。

4 当需提高试样的饱和度时，宜在水头饱和前，从底部将二氧化碳气体通入试样，置换孔隙中的空气，二氧化碳的压力宜为 5kPa~10kPa。

4.3.3 黏性土空心圆柱试样安装完成后，宜在压力室内采用反压饱和法饱和；粉土和砂土空心圆柱试样宜在压力室内先进行水头饱和，再通过反压饱和法提高饱和度。

4.3.4 毛管饱和法操作步骤应符合下列规定：

1 选用框式饱和器（图 4.3.4），在装有试样的环刀两面贴放滤纸，再放两块大于环刀的透水板于滤纸上，通过框架两端的螺丝将透水板、环刀夹紧。

2 将装好试样的饱和器放入水箱中，注入清水，水面不宜将试样淹没。

3 关上箱盖，防止水分蒸发，浸水时间约 3 天。

4 试样饱和后，取出饱和器，松开螺丝，取出环刀，擦干外壁，吸去表面积水，取下试样上下滤纸，称环刀和试样的总质量，并计算试样的饱和度。

5 当饱和度低于 95% 时，将环刀再装入饱和器，浸入水中延长饱和时间直至满足要求。

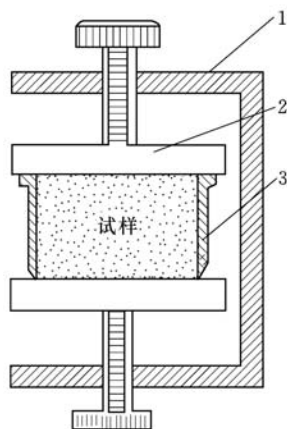


图 4.3.4 框式饱和器

1—框架；2—透水板；3—环刀

4.3.5 真空饱和法操作步骤应符合下列规定：

1 宜选用重叠式饱和器（图 4.3.5-1）或框式饱和器，在重叠式饱和器下夹板正中放置稍大于环刀直径的透水板和滤纸，将装有试样的环刀放在滤纸上，试样上再放一张滤纸和一块透水板，以此顺序由下向上重叠至拉杆的高度，将饱和器上夹板放在最上部透水板上，旋紧拉杆上端的螺丝，将各个环刀在上下夹板间夹紧。

2 装好试样的饱和器放入真空饱和装置（图 4.3.5-2），盖上缸盖。盖缝内应涂一薄层凡士林，以防漏气。

3 关管夹、开二通阀，将抽气机与真空缸接通，开动抽气机，抽除缸内及土中气体，当真空表接近 -100kPa 后，继续抽气，黏性土宜为 1h，粉土宜为 0.5h 后，稍微开启管夹，将清水

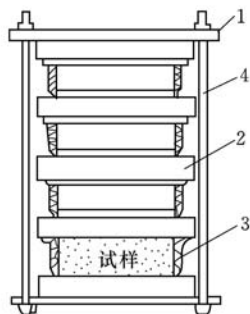


图 4.3.5-1 重叠式饱和器
1—夹板；2—透水板；3—环刀；
4—拉杆

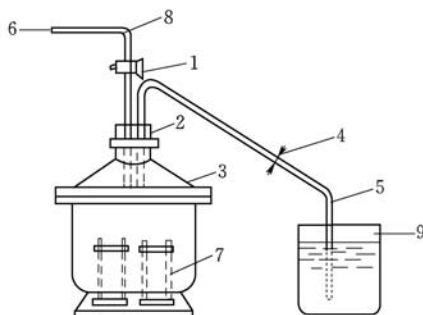


图 4.3.5-2 真空饱和装置
1—二通阀；2—橡皮塞；3—真空缸；
4—管夹；5—引水管；6—接抽
气机；7—饱和器；8—排气
管；9—水缸

由引水管缓慢注入真空缸内。在注水过程中，应调节管夹，使真空表上的数值保持不变。

4 待饱和器完全淹没水中后，即停止抽气。将引水管自水缸中提出，打开管夹使空气进入真空缸内，静置一定时间，细粒土宜为 10h，使试样充分饱和。

4.3.6 反压饱和法操作步骤应符合下列规定：

1 试样装好以后装上压力室罩，关孔隙压力阀和反压力阀，测记体变管读数。宜先对试样施加 20kPa 的围压预压，并开孔隙压力阀待孔隙压力稳定后记下读数，然后关孔隙压力阀。

2 反压力应分级施加，同时分级施加围压，以减少对试样的扰动。在施加反压力过程中，宜始终保持围压比反压力大 20kPa。反压力和围压的每级增量，软黏土宜取 30kPa。硬塑、可塑的土或初始饱和度较低的土宜取 50kPa~70kPa。

3 操作时，先调围压至 50kPa，并将反压力系统调至 30kPa，同时打开围压阀和反压力阀，再缓缓打开孔隙压力阀，待孔隙压力稳定后，测记孔隙压力计和体变管读数，再施加下一

级围压和反压力。

4 计算每级围压下的孔隙压力增量，并与围压增量比较，当孔隙水压力增量与围压增量之比不小于 0.98 时，认为试样饱和；否则应重复上述步骤，直至试样饱和为止。

4.3.7 岩样单轴抗压强度试验、单轴压缩变形试验、直剪试验、点荷载试验的试件饱和应符合下列规定：

1 采用自由吸水法时，应将试件放入水槽，注水至试件高度的 1/4 处，隔 2h 后注水至试件高度的 1/2 处，隔 4h 后注水至试件高度的 3/4 处，6h 后全部浸没试件。试件全部浸入在水中自由吸水 48h 后，取出试件拭干表面水分并称量。

2 采用煮沸法时，煮沸容器内的水面应始终高于试件，煮沸时间不应少于 6h。经煮沸饱和的试件应放置在原容器中冷却至室温，取出试件拭干表面水分并称量。

3 采用真空饱和法时，饱和容器内的水面应高于试件，真空压力宜为 -100kPa ，抽气时间不应少于 4h，直至无气泡逸出。经真空饱和的试件应放置在原容器中，在大气压力下静置 4h，取出试件拭干表面的水分并称量。

5 土的物理性质试验

5.1 含水率试验

5.1.1 含水率试验应以烘干法为室内试验的标准方法。

5.1.2 烘干法试验应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。采用烘干法测定土样含水率时，对有机质含量不大于干土质量 5% 的土，烘干温度应控制在 105℃～110℃；对有机质含量大于干土质量 5% 的土，烘干温度应控制在 65℃～70℃。

5.2 密度试验

5.2.1 细粒土密度试验宜采用环刀法。试样易碎裂、难以切割时，可用蜡封法。现场测定粗粒土的密度宜采用灌水法或灌砂法。

5.2.2 密度试验方法应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

5.3 颗粒分析试验

5.3.1 颗粒分析试验宜根据土的颗粒大小及级配情况，采用筛析法、密度计法和移液管法。筛析法可用于粒径在 0.075mm～60mm 的土；密度计法和移液管法可用于粒径小于 0.075mm 的土；当粗细颗粒兼有时，应联合使用筛析法与密度计法或移液管法。

5.3.2 筛析法、密度计法、移液管法的试验方法应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

5.4 界限含水率试验

5.4.1 界限含水率试验宜采用液塑限联合测定法、碟式液限仪法和搓滚法。液塑限联合测定法可用于粒径小于 0.5mm 的土且有机质含量不大于 5% 的土；碟式液限仪法可用于测定粒径小于 0.5mm 土的液限，搓滚法可用于测定粒径小于 0.5mm 土的塑限。

5.4.2 界限含水率试验应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

5.5 土粒比重试验

5.5.1 土粒比重试验宜按照土粒粒径不同，分别采用比重瓶法、浮称法和虹吸筒法。比重瓶法可用于粒径小于 5mm 的土。浮称法可用于粒径不小于 5mm 的土且粒径大于 20mm 的颗粒小于 10% 的土。虹吸筒法可用于粒径不小于 5mm 的各类土，其中粒径大于 20mm 的颗粒大于等于 10% 的土。

5.5.2 土粒比重宜采用纯水测定。对含有易溶盐、亲水性胶体或有机质的土，应采用煤油等中性液体替代纯水测定。

5.5.3 土粒比重试验方法应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

5.6 相对密度试验

5.6.1 相对密度试验方法可用于粒径不大于 5mm，且粒径 2mm~5mm 的质量不大于总质量 15% 的粉土和砂土。

5.6.2 最小干密度试验宜采用漏斗法和量筒法，最大干密度试验应采用振动锤击法，并应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

5.7 击实试验

5.7.1 击实试验可采用轻型击实试验或重型击实试验。轻型击

实试验宜用于粒径小于 5mm 的黏性土。重型击实试验宜用于粒径不大于 20mm 的土。重型击实采用三层击实时，最大粒径不应大于 40mm。

5.7.2 试验试样宜采用干法或湿法制备。

5.7.3 击实试验方法应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

5.8 导热系数试验

5.8.1 各类均质土和软岩的导热系数试验宜采用热探针法。

5.8.2 热探针法试验主要仪器设备应符合下列规定：

- 1 热探针（图 5.8.2）应包含线性热源和热线偶元件。
- 2 应采用电流恒定的电源。
- 3 测温读数器的最小分度值应为 0.01K。
- 4 万用表的电压最小分度值为 0.01V，电流最小分度值为 0.01A。
- 5 计时器的最小分度值为 0.1s。
- 6 钻孔装置应确保在样品上的钻孔深度与热探针长度相同，直径等于或稍大于热探针的直径。
- 7 称量天平的最小分度值为 0.01g。

5.8.3 原状试样应符合下列规定：

- 1 土样宜取薄壁取样器或塑料采样管样品，样品长度为 $200\text{mm} \pm 3\text{mm}$ ，直径不应小于 50mm。
- 2 土样的长度和直径测量，每样品测量不少于三点，精确至 0.1mm，取平均值。
- 3 在硬土和软岩中难以插入时，可预先在样品中钻孔。

5.8.4 重塑样可将预定干密度和含水率的土样压入薄壁取样器或塑料采样管内，土样称量应精确至 0.01g，并按本规程第 5.8.3 条执行。

5.8.5 在试验前应对热探针进行校准，测定校正系数，校准应

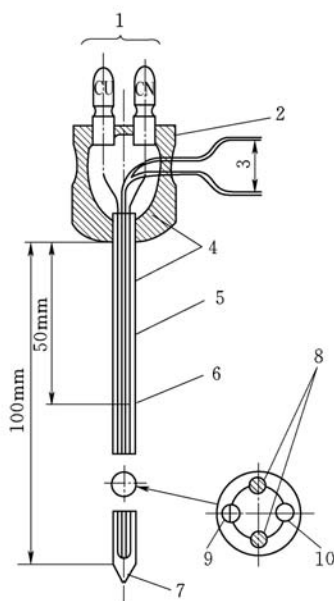


图 5.8.2 热探针

- 1—热线偶插口；2—胶木；3—6V~12V 恒流电源，1A；4—环氧树脂填充物；
 5—针管， $\phi 1.4\text{mm}$ 或 $\phi 1.8\text{mm}$ ；6—热线偶接头；7—环氧树脂针尖；
 8—电热元件，26 号锰铜或 30 号镍铬合金线；9—30 号铜， $\phi 0.25\text{mm}$ ；
 10—30 号康铜， $\phi 0.25\text{mm}$

符合下列规定：

- 1 测定标准试样的导热系数，校正系数应按下式计算：

$$C = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \quad (5.8.5)$$

式中：C——校正系数；

λ_0 ——标准试样的已知导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ；

λ_1 ——标准试样的导热系数实测值 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 。

- 2 标准试样可采用派热克斯玻璃 7740、石英玻璃、25℃下

导热系数为 $0.286\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的甘油或 25°C 下导热系数为 $0.607\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的含琼脂 5g/L 去离子水。

3 标准试样应采用圆柱体，圆柱直径不宜小于热探针直径的 10 倍，且不宜小于 40mm ，长度不宜小于热探针长度的 1.2 倍。

4 对于固态标准试样，宜沿圆柱样的中轴钻取与热探针等深的钻孔，直径应等于或稍大于热探针的直径，钻孔与探针的间隙宜用热油脂填满。

5.8.6 热探针法试验的操作步骤应符合下列规定：

1 试验前，测定并记录土样的初始含水率和干密度。

2 将试样置于预设温度环境下达到恒温状态。

3 将热探针完全插入待测土样。

4 连接热探针至已知的恒流电源。

5 将测温设备连接到测温读数器。

6 探针加热时间应与热探针的直径相适应，对于直径不大于 2.54mm 的探针，加热时间宜为 $30\text{s} \sim 60\text{s}$ ；直径大于 2.54mm 的探针，加热时间可适度延长。加热期间测记时间和温度不少于 20 次。

7 切断恒流电源。

8 如需冷却段的数据，应在探针冷却期间间隔测记时间和温度不少于 20 次。

5.8.7 热探针法数据整理应符合下列规定：

1 对直径不大于 2.54mm 的热探针，应剔除加热或冷却前 $10\text{s} \sim 30\text{s}$ 的数据；对直径大于 2.54mm 的热探针，应绘制温度与时间对数 $\ln t$ 的曲线图，并剔除非线性段的数据。应用剩余数据，采用线性回归法确定线性段的斜率。

2 导热系数可选择加热段或冷却段的数据，并按下列公式计算：

$$\lambda = \frac{CQ}{4\pi S} = \frac{2.3CQ}{4\pi S_{10}} \quad (5.8.7-1)$$

$$Q = I^2 \frac{R}{L} = \frac{UI}{L} \quad (5.8.7-2)$$

式中： λ ——导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];

C ——校正系数;

Q ——输入的热量 (W/m);

S ——温度与时间对数 $\ln t$ 曲线图中线性段的斜率, 可取 $(S_h + S_c)/2$, 其中 S_h 为加热段温度与 $\ln t$ 曲线线性段的斜率, S_c 为冷却段温度与 $\ln t$ 曲线线性段的斜率;

S_{10} ——温度与时间对数 $\lg t$ 曲线图中线性段的斜率, 可取 $(S_{h10} + S_{c10})/2$, 其中 S_{h10} 为加热段温度与 $\lg t$ 曲线线性段的斜率, S_{c10} 为冷却段温度与 $\lg t$ 曲线线性段的斜率;

I ——通过热线偶的电流 (A);

R ——热线偶的总电阻 (Ω);

L ——探针总长度 (m);

U ——测量电压 (V)。

5.8.8 试验记录应主要包括项目名称、样本来源、钻孔编号、土样编号、埋深、土类、初始含水率、密度、原状或重塑样、试样状态、针插入法或预钻孔法、校正系数 C 、时间与温度曲线图和计算的导热系数 λ 。

5.9 比表面积试验

5.9.1 土的比表面积试验可采用气体吸附法。气体吸附分析介孔-大孔法可用于测量孔径范围为 $2\text{nm} \sim 100\text{nm}$ 的孔, 气体吸附分析微孔法可用于测量孔径范围为 $0.4\text{nm} \sim 2\text{nm}$ 的孔。

5.9.2 气体吸附法应符合现行国家标准《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度》GB/T 21650 的有关规定。

6 土的力学性质试验

6.1 固结试验

6.1.1 固结试验宜采用标准固结试验。标准固结试验宜用于饱和和细粒土，可测定土的压缩系数、压缩指数、回弹指数、压缩模量、固结系数及原状土的先期固结压力等。当只测定土的压缩系数和压缩模量时，可用于非饱和和细粒土和砂土。

6.1.2 固结试验的仪器设备应符合下列规定：

1 固结容器应主要包括环刀、护环、透水板、加压上盖和量表架。

2 加压设备可采用量程为 5kN~10kN 的杠杆式、气压式或其他加压设备，其最大允许误差应符合现行国家标准《土工试验仪器 固结仪 第 1 部分：单杠杆固结仪》GB/T 4935.1、《土工试验仪器 固结仪 第 2 部分：气压式固结仪》GB/T 4935.2 的有关规定。

3 变形测量设备宜采用百分表或位移传感器；百分表量程应为 10mm，最小分度值应为 0.01mm；位移传感器的最大允许误差应为最大量程的 $\pm 0.2\%$ 。

4 天平量程应为 200g，最小分度值应为 0.01g。

6.1.3 标准固结试验步骤应符合下列规定：

1 切取原状土试样或制备给定密度与含水率的扰动土试样，制备方法应按本规程第 4.2.1 条和第 4.2.3 条执行。

2 对冲填土，可先将土样调成含水率为液限或 1.2 倍~1.3 倍液限的土膏，拌和均匀，在保湿器内静置 24h。再把环刀倒置于小玻璃板上用调土刀把土膏填入环刀，排除气泡刮平，称量。

3 试样的含水率及密度的测定应符合本规程第 5.1.2 条和

第 5.2.2 条的规定。试样饱和应符合本规程第 4.3.1 条的规定。

4 在固结容器内放置护环、透水板和薄滤纸，将带有环刀的试样，小心装入护环，再在试样上放薄滤纸、透水板和加压盖板，置于加压框架下，对准加压框架的正中，安装量表。

5 对饱和土，上、下透水板应事先浸水饱和。

6 为保证试样与仪器上下各部件之间接触良好，应施加 1kPa 的预压压力，再将量表调零。

7 确定需要施加的各级压力。加压等级宜为 12.5kPa、25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa。最后一级压力应比土层的计算压力大 100kPa~200kPa。

8 确定原状土的先期固结压力时，加压率宜小于 1，可采用 0.5 倍或 0.25 倍。最后一级压力应使 $e - \lg p$ 曲线下段出现较长的直线段。

9 第 1 级压力的大小视土的软硬程度可分别采用 12.5kPa、25.0kPa 或 50.0kPa，第 1 级施加压力应减去预压压力。

10 对饱和试样，应在施加第 1 级压力后，立即向水槽中注水至满。

11 测定沉降速率时，加压后可按下列时间顺序测记量表读数：6s、15s、1min、2min15s、4min、6min15s、9min、12min15s、16min、20min15s、25min、30min15s、36min、42min15s、49min、64min、100min、200min 和 400min 及 23h 和 24h 至稳定为止。

12 不测定沉降速率时，稳定标准应为每级压力下固结 24h 或每小时变形不大于 0.01mm。测记稳定读数后，应再施加第 2 级压力，依次逐级加压至试验结束。

13 需做回弹试验时，可在大于上覆有效应力的某级压力下固结稳定后逐级卸压，直至卸至第 1 级压力。每次卸压后的回弹稳定标准与加压时相同，并测记每级压力的回弹量。

14 需做次固结试验时，可在主固结试验结束后继续试验至

固结稳定为止。

15 试验结束后应迅速拆除仪器各部件，取出带环刀的试样。如需测定试验后含水率，可用干滤纸吸去试样两端表面上的水，再测定其含水率。

6.1.4 当只测定土的压缩系数和压缩模量时，可采用下列操作步骤：

1 切取原状土试样或制备给定密度与含水率的扰动土试样。制备方法应符合本规程第 4.2.1 条和第 4.2.3 条的规定。

2 对冲填土，可先将土样调成含水率为液限或 1.2 倍~1.3 倍液限的土膏，拌和均匀，在保湿器内静置 24h。再把环刀倒置于小玻璃板上用调土刀把土膏填入环刀，排除气泡刮平，称量。

3 测定试样的含水率和密度。

4 在固结容器内放置护环、透水板和薄滤纸，将带有环刀的试样，小心装入护环，再在试样上放薄滤纸、透水板和加压盖板，置于加压框架下，对准加压框架的正中，安装量表。

5 对饱和土，上、下透水板应事先浸水饱和；对非饱和状态的试样，透水板湿度应与试样湿度接近。

6 为保证试样与仪器上下各部件之间接触良好，应施加 1kPa 的预压压力，将量表指针调零。

7 确定需要施加的各级压力。加压等级宜为 12.5kPa、25kPa、50kPa、100kPa、200kPa、400kPa、800kPa、1600kPa、3200kPa。最后一级压力应比土层的计算压力大 100kPa~200kPa。

8 第 1 级压力的大小视土的软硬程度可分别采用 12.5kPa、25.0kPa 或 50.0kPa，第 1 级实加压力应减去预压压力，最大压力不应小于 400kPa。

9 对饱和试样，则在施加第 1 级压力后，立即向水槽中注水至满。如系非饱和试样，应用湿棉围住加压盖板四周，避免水分蒸发。

10 加压后测记 1h 时的试样高度变化，并立即施加下一级

压力，逐级加压至所需压力。加最后一级压力时除测记 1h 时的试样变形外，还需测记试样达到压缩稳定时的量表读数。稳定标准应为每小时变形不大于 0.01mm 或最后一级压力下固结 24h。

11 试验结束后应迅速拆除仪器各部件，取出带环刀的试样。如需测定试验后的含水率，可用干滤纸吸去试样两端表面上的水，再测定其含水率。

6.1.5 标准固结试验各项指标计算应符合下列规定：

1 试样的初始孔隙比 e_0 可按下式计算：

$$e_0 = \frac{\rho_w G_s (1 + 0.01 w_0)}{\rho_0} - 1 \quad (6.1.5-1)$$

式中： e_0 ——初始孔隙比；

ρ_w ——水的密度 (g/cm^3)；

G_s ——土粒比重；

w_0 ——试样的初始含水率 ($\%$)；

ρ_0 ——试样的天然密度 (g/cm^3)。

2 各级压力下固结稳定后的孔隙比 e_i 可按下式计算：

$$e_i = e_0 - (1 + e_0) \frac{\sum_{i=1}^n \Delta h_i}{h_0} \quad (6.1.5-2)$$

式中： e_i ——某级压力下的孔隙比；

Δh_i ——某级压力下试样高度变化 (cm)；

h_0 ——试样初始高度 (cm)。

3 某一压力范围内的压缩系数 a_v 可按下式计算：

$$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \quad (6.1.5-3)$$

式中： a_v ——压缩系数 [$(\text{MPa})^{-1}$]；

p_i ——某一单位压力值 (MPa)。

4 某一压力范围内的压缩模量 E_s 和体积压缩系数 m_v 可按下列公式计算：

$$E_s = \frac{1+e_0}{a_v} \quad (6.1.5-4)$$

$$m_v = \frac{1}{E_s} = \frac{a_v}{1+e_0} \quad (6.1.5-5)$$

式中： E_s ——压缩模量 (MPa)；

m_v ——体积压缩系数 $[(\text{MPa})^{-1}]$ 。

5 压缩指数 C_c 及回弹指数 C_s 应按下列公式计算：

$$C_c = \frac{e_i - e_{i+1}}{\lg p_{i+1} - \lg p_i} \quad (6.1.5-6)$$

$$C_s = \frac{e_i - e_{i+1}}{\lg p_{i+1} - \lg p_i} \quad (6.1.5-7)$$

式中： C_c ——压缩指数， $e - \lg p$ 曲线直线段的斜率；

C_s ——回弹指数， $e - \lg p$ 曲线回弹直线段的斜率。

6.1.6 应以孔隙比 e 为纵坐标，压力 p 为横坐标，绘制孔隙比与压力的关系曲线。

6.1.7 原状土的先期固结压力 p_c 的确定宜采用卡萨格兰德图解法。

6.1.8 固结系数 C_v 计算应符合下列规定：

1 时间平方根法应按下列步骤进行：

- 1) 对于某一压力，以量表读数 d 为纵坐标，时间平方根 \sqrt{t} 为横坐标，绘制 $d - \sqrt{t}$ 曲线 (图 6.1.8-1)。
- 2) 延长 $d - \sqrt{t}$ 曲线开始段的直线，交纵坐标轴于理论零点 d_s 。
- 3) 过 d_s 绘制另一直线，其横坐标为前一直线横坐标的 1.15 倍，则后一直线与 $d - \sqrt{t}$ 曲线交点所对应时间的平方根即为试样固结度达 90% 所需的时间 t_{90} 。
- 4) 该压力下的固结系数应按下列公式计算：

$$C_v = \frac{0.848(\bar{h})^2}{t_{90}} \quad (6.1.8-1)$$

式中： C_v ——固结系数 (cm^2/s)；

\bar{h} ——最大排水距离，取某一压力下试样初始与终了高度的平均值的二分之一 (cm)；

t_{90} ——固结度达 90% 所需的时间 (s)。

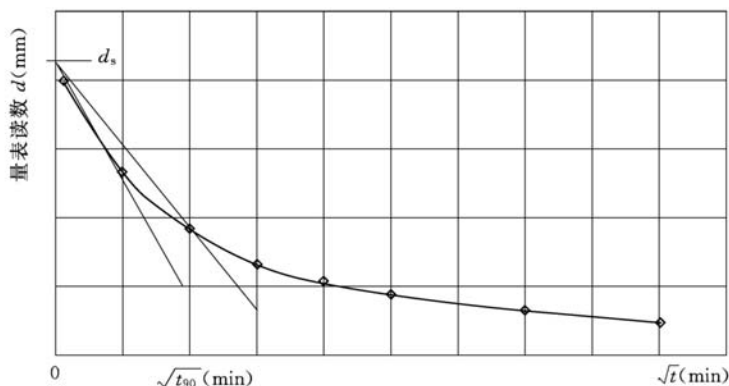


图 6.1.8-1 $d - \sqrt{t}$ 曲线

2 时间对数法应按下列步骤进行：

1) 对某一压力，以量表读数 d 为纵坐标，时间在对数横坐标上，绘制 $d - \lg t$ 曲线（图 6.1.8-2）。

2) 延长 $d - \lg t$ 曲线的开始线段，选任一时间 t_1 ，相对应的量表读数为 d_1 ，再取时间 $t_2 = \frac{t_1}{4}$ ，相对应的量表读数为 d_2 ，则 $2d_2 - d_1$ 之值为 d_{01} 。如此再选取另一时间，依同法求得 d_{02} 、 d_{03} 、 d_{04} 等，取其平均值即为理论零点 d_0 。

3) 延长曲线中部的直线段和通过曲线尾部数点切线的交点即为理论终点 d_{100} ，则 $d_{50} = \frac{d_0 + d_{100}}{2}$ ，取对应于 d_{50} 的时间为试样固结度达到 50% 所需的时间 t_{50} 。

4) 固结系数 C_v 可按式计算:

$$C_v = \frac{0.197(\bar{h})^2}{t_{50}} \quad (6.1.8-2)$$

式中: t_{50} ——固结度达 50% 所需的时间 (s)。

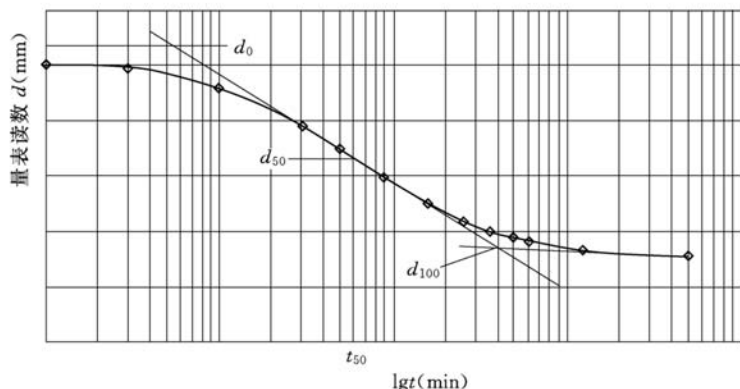


图 6.1.8-2 $d - \lg t$ 曲线

6.1.9 对某一压力, 应以孔隙比 e 为纵坐标, 绘制 $e - \lg t$ 曲线。以主固结结束后试验曲线下部的直线段的斜率为次固结系数, 可按式计算:

$$C_a = \frac{e_1 - e_2}{\lg(t_2/t_1)} \quad (6.1.9)$$

式中: C_a ——次固结系数;

e_1 ——对应次固结阶段时间 t_1 时的孔隙比;

e_2 ——对应次固结阶段时间 t_2 时的孔隙比;

t_1 、 t_2 ——次固结某一时间 (min)。

6.1.10 按本规程第 6.1.4 条测定土的压缩系数和压缩模量时, 计算应符合本规程第 6.1.5 条第 1~4 款的规定, 并宜校正各级压力下试样的变形量, 校正后的总变形量可按式计算:

$$\sum \Delta h_i = (h_i)_t \frac{(h_n)_T}{(h_n)_t} \quad (6.1.10)$$

式中： $\Sigma\Delta h_i$ ——某一压力下校正后的总变形量（mm）；
 $(h_i)_t$ ——某一压力下固结 1h 的总变形量（mm）；
 $(h_n)_t$ ——最后一级压力下固结 1h 的总变形量（mm）；
 $(h_n)_T$ ——最后一级压力下达到稳定标准的总变形量（mm）。

6.1.11 固结试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.1 的格式。

6.2 直接剪切试验

I 一般规定

6.2.1 直接剪切试验可用于测定土的抗剪强度参数，可采用快剪、固结快剪和慢剪三种剪切方式。快剪试验和固结快剪试验可用于渗透系数小于 10^{-6} cm/s 的细粒土，慢剪试验可用于细粒土与粒径小于 2mm 的砂土。

6.2.2 直接剪切试验主要设备应符合下列规定：

1 应变控制式直剪仪包括剪切盒，垂直加压框架，测力计及推动机构等。

2 位移传感器或位移计的量程为 5mm~10mm，最小分度值为 0.01mm。

3 天平量程 500g，最小分度值 0.1g。

4 环刀内径 6.18cm，高 2cm。

6.2.3 直剪试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.2 的格式。

II 快剪试验

6.2.4 快剪试验操作步骤应符合下列规定：

1 装样应按下列步骤进行：

1) 对准上下盒，插入固定销。在下盒内放不透水板。将装有试样的环刀平口向下，对准剪切盒口，在试样顶面放不透水板，然后将试样缓慢推入剪切盒内，移去环刀。

2) 转动手轮，使上盒前端钢珠刚好与测力计接触。将

测力计调零。顺次加上加压盖板、钢珠、加压框架，安装垂直位移传感器或位移计，测记起始读数。

2 剪切应按下列步骤进行：

- 1) 宜根据工程实际和土的软硬程度确定 4 个试样的垂直压力，垂直压力的各差值应大致相等，可取 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 分别施加于每个试样。垂直压力可一次轻轻施加，当土质松软时，荷载可分级施加。
- 2) 施加垂直压力后，立即拔去固定销。开动秒表，以 0.8mm/min~1.2mm/min 的速率剪切。
- 3) 试样每产生 0.2mm~0.4mm 的剪切位移，测记一次剪切位移读数和测力计读数，并测记垂直位移读数。当测力计的读数达到稳定或有显著后退时，宜继续剪至剪切位移达到 4mm；当测力计读数持续增加时，剪切位移宜达到 6mm。
- 4) 剪切结束后，吸去剪切盒中积水，倒转手轮，移去垂直压力、框架、钢珠、加压盖板等，取出试样。

6.2.5 快剪试验成果整理应符合下列规定：

1 试样的剪应力应按下列式计算：

$$\tau = \frac{CR}{A_0} \times 10 \quad (6.2.5)$$

式中： τ ——剪应力（kPa）；

C ——测力计率定系数（N/0.01mm）；

R ——测力计读数（0.01mm）；

A_0 ——试样的初始面积（cm²）。

2 以剪应力为纵坐标，剪切位移为横坐标，绘制剪应力与剪切位移的关系曲线。

3 选取剪应力与剪切位移关系曲线上的峰值点或稳定值作为抗剪强度。当无明显峰点时，取剪切位移等于 4mm 对应的剪

应力作为抗剪强度。

4 以抗剪强度为纵坐标，垂直压力为横坐标，绘制抗剪强度与垂直压力的关系曲线。直线的倾角为土的内摩擦角 φ_q ，直线在纵坐标轴上的截距为土的黏聚力 c_q 。

Ⅲ 固结快剪试验

6.2.6 固结快剪试验操作步骤应符合下列规定：

1 装样应按下列步骤进行：

- 1) 试样安装应符合本规程第 6.2.4 条第 1 款的规定。
试样上下两面的不透水板改放湿滤纸和透水板。
- 2) 当试样为饱和样时，在施加垂直压力 5min 后，往剪切盒水槽内注满水；当试样为非饱和土时，可仅在加压盖板周围包以湿棉花。

2 固结应按下列步骤进行：

- 1) 宜根据工程实际和土的软硬程度确定 4 个试样的垂直压力，垂直压力的各差值应大致相等。垂直压力可一次轻轻施加，当土质松软时，荷载可分级施加。
- 2) 在试样上施加规定的垂直压力后，测记垂直变形读数。固结稳定标准应为每小时垂直变形读数变化不大于 0.005mm。

3 试样固结稳定后，以 0.8mm/min~1.2mm/min 的速率剪切，剪切应按本规程第 6.2.4 条第 2 款执行。

6.2.7 固结快剪试验成果整理应按本规程第 6.2.5 条执行，固结快剪试验测得的 c 、 φ 值应表示为 c_{cq} 及 φ_{cq} 。

Ⅳ 慢剪试验

6.2.8 慢剪试验操作步骤应符合下列规定：

1 装样应按下列步骤进行：

- 1) 试样安装应符合本规程第 6.2.6 条第 1 款的规定。
试样上下两面的不透水板改放湿滤纸和透水板。
- 2) 当试样为饱和样时，在施加垂直压力 5min 后，往

剪切盒水槽内注满水；当试样为非饱和土时，可仅在加压盖板周围包以湿棉花。

2 固结应符合本规程第 6.2.6 条第 2 款的规定。

3 待试样固结稳定后剪切，剪切速率应小于 0.02mm/min ，剪切应按本规程第 6.2.4 条第 2 款执行。

6.2.9 慢剪试验成果整理可按本规程第 6.2.5 条执行，慢剪试验测得的 c 、 φ 值应表示为 c_s 及 φ_s 。

6.3 残余强度试验

I 排水反复直接剪切试验

6.3.1 排水反复直接剪切试验可用于细粒土与泥化夹层，加荷方式宜采用应变控制式。

6.3.2 排水反复直接剪切试验应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

II 环剪试验

6.3.3 环剪试验可用于扰动细粒土，加荷方式宜采用应变控制式。

6.3.4 环剪试验可分别采用 Bishop 环剪仪（图 6.3.4-1）和 Bromhead 环剪仪（图 6.3.4-2），主要仪器设备宜符合下列规定：

1 应变控制式环剪仪包括剪切盒、荷载板、透水板、加载装置、测量装置、水浴等。

2 剪切盒可采用上下限制环或整体限制环，限制环内径不宜小于 50mm ，且内径与外径之比不宜小于 0.6。试样在固结和剪切之前的初始高度不宜小于 5mm ，试样中颗粒最大粒径不宜大于试样高度的 $1/10$ 。

3 透水板分别固定在荷载板与剪切盒底部。透水板表面粗糙且带齿纹使与土样固定接触，透水板的齿纹高度宜为试样初始高度的 $10\%\sim 15\%$ 。

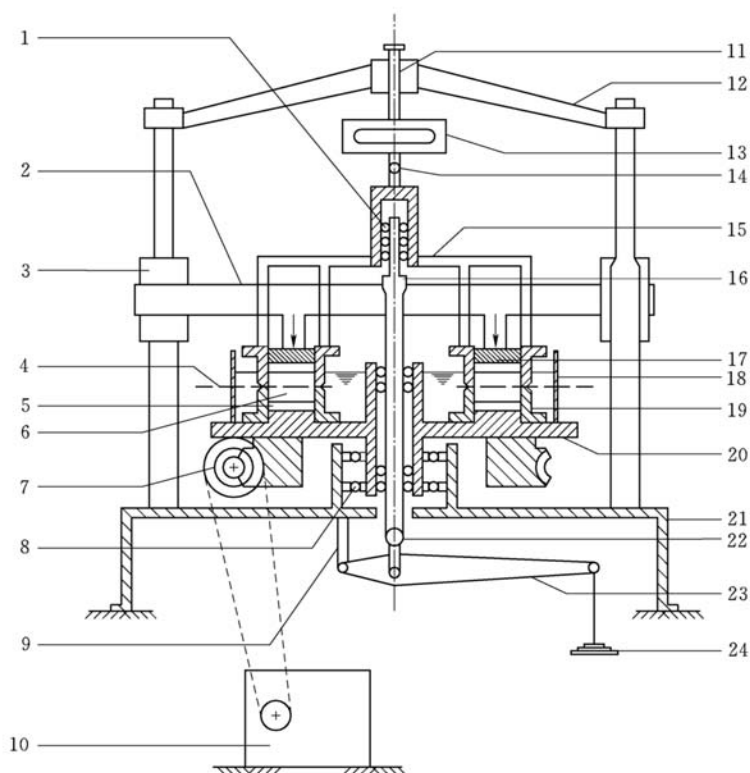


图 6.3.4-1 Bishop 环剪仪示意图

- 1—滚珠轴承；2—加载框架和施加力矩的横梁；3—量测剪切力的测力计；4—剪切面；5—带齿纹的透水板；6—试样；7—蜗轮蜗杆；8—定位轴承；9—可调整的支架；10—马达和变速箱；11—调整盒缝的差动螺丝；12—刚性框架；13—量测侧限环壁摩擦力的测力计；14—可转动的联接；15—上侧限环吊架；16—主轴；17—带齿纹透水板的荷载板；18—水浴；19—上、下侧限环；20—转动台；21—底座；22—可转动的联接；23—杠杆加载设备；24—砝码

4 加载装置包括法向加载装置与剪切加载装置。法向加载装置可采用静荷载杠杆加载架或伺服加载装置；剪切加载装置可

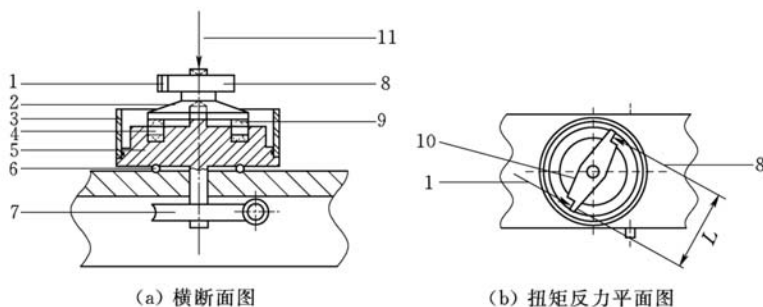


图 6.3.4-2 Bromhead 环剪仪示意图

- 1—剪切力反力 1；2—加载帽；3—水浴；4—试样；5—剪切盒；
6—滚珠轴承；7—扭转驱动装置；8—剪切力反力 2；
9—带齿纹的透水板；10—扭矩臂；11—法向荷载

采用电动马达和齿轮控制箱。

5 测量装置包括剪切力测力计、摩擦力测力计、角位移传感器、位移传感器或位移计。

6.3.5 环剪试验操作步骤应符合下列规定：

1 将装有试样的剪切盒放入并固定在水浴中，将带齿纹的透水板的荷载板放置在试样顶部。

2 施加 3.0kPa 的法向力，其中法向力应包括固定荷载和荷载板重力。固定并调整法向位移测量设备，并读取初始位移读数。

3 用无气水充满水浴，在试样固结过程保持满水状态。施加法向压力进行固结。法向压力可根据土层的计算压力确定，各级差值宜大致相等，四个试样的法向压力可分别取 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa。

4 固结稳定标准可取每小时法向位移变化量不大于试样初始高度的 0.25‰。采用 Bishop 环剪仪时，试样固结完成后，取出上、下限制环之间的连接螺栓，并用差动螺丝把盒缝从开始的 0.025mm~0.05mm 扩大，缝宽应保持在 0.3mm~1.0mm。

5 开动马达，以不大于 $0.048^{\circ}/\text{min}$ 的扭转速率进行剪切。当剪应力—位移曲线近似水平时停止剪切。

6 剪切结束后测记法向位移读数，将水浴中的水排干，吸去剪切盒中积水，卸除位移传感器或位移计、法向压力、测力环等。将荷载板从试样剪切盒上沿着剪切破坏面以滑移方式取出，不应将荷载板垂直于剪切破坏面拉出，应避免破坏试样。可用照相、简图或者其他描述方式记录剪切破坏面形态。

6.3.6 环剪试验成果整理应符合下列规定：

1 剪切面上的法向应力应按下式计算：

$$\sigma'_n = \frac{P}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \times 10 \quad (6.3.6-1)$$

式中： σ'_n ——剪切面上的法向应力（kPa）；

P ——施加在试样上的法向力（N）；

r_1 、 r_2 ——试样内、外半径（cm）。

2 剪切面上的平均剪应力应按下式计算：

$$\tau = \frac{3(F_1 + F_2)L}{4\pi(r_2^3 - r_1^3)} \times 10 \quad (6.3.6-2)$$

$$F_1 = C_1 R_1 \quad (6.3.6-3)$$

$$F_2 = C_2 R_2 \quad (6.3.6-4)$$

式中： τ ——剪切面上的平均剪应力（kPa）；

F_1 、 F_2 ——扭矩臂两端测力计测得的剪切力（N）；

C_1 、 C_2 ——扭矩臂两端测力计率定系数（N/0.01mm）；

R_1 、 R_2 ——扭矩臂两端测力计读数（0.01mm）；

L ——扭矩臂长度（cm）。

3 剪切面上的平均剪切位移可按下式计算：

$$S = \frac{\theta}{57.3} \times \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (6.3.6-5)$$

式中：S——剪切面上的平均剪切位移（cm）；

θ ——环形剪切角位移（°）。

4 以剪应力为纵坐标，剪切位移为横坐标，绘制剪应力与剪切位移的关系曲线，取曲线上最终稳定值作为残余强度。以残余强度为纵坐标，垂直压力为横坐标，经原点绘制残余强度曲线，取其倾角为土的残余内摩擦角 φ_r 。

6.3.7 环剪法残余强度试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.3 的格式。

6.4 土与钢管桩界面特性试验

6.4.1 土与钢管桩界面特性试验可采用环剪法，加荷方式宜采用应变控制式，可用于细粒土和粒径小于 2mm 的砂土，测定土与钢管桩之间的界面参数。

6.4.2 试验所用的仪器设备应主要包括模拟表面粗糙度的环形钢板、剪切盒、荷载板、透水板、加载装置、测量装置、水浴等。仪器设备应符合本规程第 6.3.4 条的规定。

6.4.3 试样与环形钢板的制备应符合下列规定：

1 环形钢板的表面材料与粗糙度应与钢管桩的表面保持一致，可通过喷丸毛化的工艺模拟粗糙度。

2 细粒土应在天然含水率条件下进行重塑后填入环形剪切盒，应在重塑前剔除 2mm 以上的粗颗粒。

3 当细粒土太硬而无法重塑时，宜将无气水均匀混入扰动土样中，制备成液性指数为 0~0.2 的土样。当土样在固结阶段发生大变形时，宜将试样在空气中风干至液性指数为 0~0.2 的含水率。

4 土样至少分两层填入环形剪切盒，每层用同样的均布压力进行压实，压实后干密度宜等于原状样干密度。应确保土与钢板的平整接触，并应避免细粒土中夹有气泡。

6.4.4 试验操作应符合下列规定：

1 固结应按下列步骤进行：

- 1) 根据原位地层水平向有效应力施加法向压力。法向压力可一次缓慢施加，若土质松软，也可分级施加以防试样挤出。在第一级荷载施加后，用无气水充满水浴，在试样固结过程中应保持满水状态。
- 2) 在试样上施加规定的法向压力后，测记法向位移读数。固结稳定标准应为每小时法向位移的变化量不大于试样初始高度的 0.25‰。
- 3) Bishop 环剪仪与 Bromhead 环剪仪法向压力的最小值不应低于 50kPa。Bromhead 环剪仪固结变形量不应超过试样初始高度的 15%。

2 界面剪切应按下列步骤进行：

- 1) 试样在一系列脉冲荷载下进行剪切，总位移不宜少于 1m。每次脉冲剪切位移宜为 180mm~220mm，剪切速率宜为 500mm/min。在每次脉冲剪切后暂停，Bishop 环剪仪的暂停时间宜为 10min，Bromhead 环剪仪的暂停时间宜为 3min，暂停过程不施加剪切力。
- 2) 剪切过程中，当土样从界面明显挤出、法向位移较大时，可采取降低脉冲剪切速率、减小脉冲剪切位移、关闭 Bishop 环剪仪中限制环与剪切面之间的间隙等措施。
- 3) 待土样产生的超孔隙水压力消散后，施加法向压力进行再次固结，法向压力宜为实际工程中工作荷载下超孔隙水压力消散后桩周土的水平向有效应力。固结稳定标准应为每小时法向位移的变化量不大于试样初始高度的 0.25‰。
- 4) 对界面进行排水剪，对于黏性土，Bishop 环剪仪的

剪切速率宜采用 0.005mm/min ，Bromhead 环剪仪的剪切速率宜采用 0.02mm/min 。当界面剪应力-剪切位移关系曲线近似水平时可停止剪切。

6.4.5 试验成果整理应符合下列要求：

1 试验成果的分析计算应符合本规程第 6.3.6 条第 1~3 款的规定。

2 绘制界面剪应力与剪切位移的关系曲线，取曲线上的峰值作为峰值强度，最终稳定值作为残余强度。绘制抗剪强度与法向压力关系曲线。

3 经原点绘制峰值强度曲线，其倾角为界面的峰值内摩擦角 φ_p ；经原点绘制残余抗剪强度曲线，其倾角为界面的残余内摩擦角 φ_r 。

6.4.6 土与钢管桩界面特性试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.4 的格式。

6.5 渗透试验

6.5.1 常水头渗透试验可用于粗粒土，变水头渗透试验可用于细粒土。

6.5.2 试验用水宜采用工程所在海域的海水，也可用纯水或过滤的清水。在试验前应对试验用水用抽气法或煮沸法进行脱气。试验时的水温宜高于室温 $3^{\circ}\text{C}\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。

6.5.3 渗透系数的最大允许差值应为 $2\times 10^{-n}\text{cm/s}$ ，应取 3 个或 4 个在允许差值范围内的数据，以其平均值作为试样在该孔隙比时的渗透系数。

6.5.4 试验应以 20°C 为标准温度，计算标准温度下的渗透系数。

6.5.5 试验方法应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

6.6 三轴压缩试验

I 一般规定

6.6.1 三轴压缩试验可采用不固结不排水剪、固结不排水剪和固结排水剪三种试验方法，可用于粒径小于 20mm 的土。

6.6.2 试验仪器设备应符合下列规定：

1 宜采用应变控制式三轴仪，包括三轴压力室、轴向加压设备、围压控制系统、反压控制系统、量测系统。

2 应包括孔隙水压力、轴向力、轴向变形和体积变化量测系统。

3 试样直径可为 39.1mm、61.8mm 及 101mm，试样高度与直径之比应为 2.0~2.5。

II 不固结不排水剪试验

6.6.3 不固结不排水剪试验可用于测定土的不排水抗剪强度、不排水割线模量和 ϵ_{50} 。

6.6.4 不固结不排水剪试验步骤应符合下列规定：

1 装样应按下列步骤进行：

1) 对压力室底座充水，在底座上放置不透水板，并依次放置试样、不透水板及试样帽。砂土试样安装应按本规程第 4.2.4 条的规定进行。

2) 将橡皮膜套在承膜筒内，两端翻出筒外，从吸气孔吸气，使膜贴紧承膜筒内壁，套在试样外，放气，翻起橡皮膜的两端，取出承膜筒。用橡皮圈将橡皮膜分别扎紧在压力室底座和试样帽上。

3) 装上压力室罩。安装时应先将活塞提升，防止碰撞试样，压力室罩安放后，将活塞对准试样帽中心，并均匀地旋紧螺丝。

4) 打开排气孔，向压力室充水，当压力室内快注满水时，降低进水速度，水从排气孔溢出时，关闭排气孔。

- 5) 关闭体变传感器或体变管阀及孔隙水压力阀, 开围压阀, 施加所需的围压。围压大小应与工程的实际最小主应力相适应, 并尽可能使最大围压与土体实际最小主应力的最大值大致相等。也可按 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa 施加。
- 6) 上升升降台, 当试样帽与活塞及测力计接近时, 改用上升位移细调, 使试样帽与活塞及测力计接触, 然后将轴向测力计、轴向位移传感器或位移计的读数调零。

2 剪切应按下列步骤进行:

- 1) 轴向应变速率宜为每分钟应变 0.5%~1.0%。
- 2) 开始阶段, 试样每产生轴向应变 0.3%~0.4%时, 测记轴向力和轴向位移读数各 1 次; 当轴向应变达 3%以后, 读数间隔可延长为 0.7%~0.8%各测记 1 次; 当接近峰值时应加密读数; 当试样为特别硬脆或软弱土时, 可加密或减少测读的次数。
- 3) 当出现峰值后, 再继续剪 3%~5%轴向应变; 若轴向力读数无明显减少, 则剪切至轴向应变达 15%~20%。
- 4) 试验结束后应关闭电动机, 下降升降台, 打开排气孔, 排去压力室内的水, 拆除压力室罩, 拭去试样周围的余水, 小心脱去试样外的橡皮膜, 描述破坏后形状。

6.6.5 不固结不排水剪试验成果整理应符合下列规定:

1 轴向应变应按下列式计算:

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_0} \times 100 \quad (6.6.5-1)$$

式中: ϵ_1 ——轴向应变 (%);

Δh_1 ——剪切过程中试样的高度变化 (cm);

h_0 ——试样初始高度 (cm)。

2 试样剪切时的校正断面积应按下式计算：

$$A_a = \frac{A_0}{1 - 0.01\varepsilon_1} \quad (6.6.5-2)$$

式中： A_a ——试样剪切时的校正断面积（ cm^2 ）；

A_0 ——试样的初始断面积（ cm^2 ）。

3 主应力差应按下式计算：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{CR}{A_a} \times 10 \quad (6.6.5-3)$$

式中： σ_1 ——最大主应力（kPa）；

σ_3 ——最小主应力（kPa）；

$\sigma_1 - \sigma_3$ ——主应力差（kPa）；

C ——测力计率定系数（ $\text{N}/0.01\text{mm}$ ）；

R ——测力计读数（ 0.01mm ）。

4 以主应力差为纵坐标，轴向应变为横坐标，绘制主应力差与轴向应变的关系曲线（图 6.6.5）。取曲线上主应力差的峰值点作为破坏点，无峰值时，取曲线上 15% 轴向应变对应的点作为破坏点。

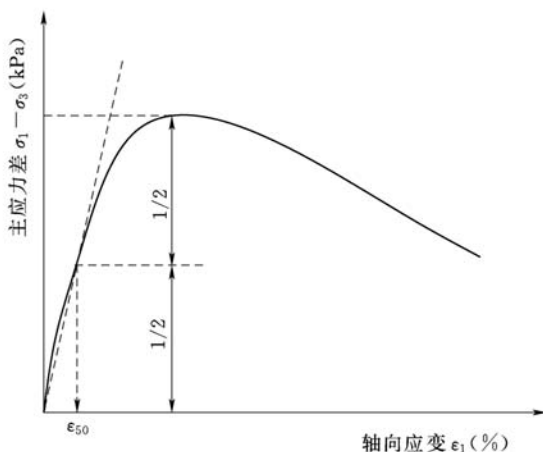


图 6.6.5 主应力差与轴向应变的关系曲线

5 不排水割线模量应按下式计算：

$$E_{se} = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2\varepsilon_{50}} \times 0.1 \quad (6.6.5-4)$$

式中： E_{se} ——不排水割线模量（MPa）；

σ_{1f} ——破坏时的最大主应力（kPa）；

σ_{3f} ——破坏时的最小主应力（kPa）；

ε_{50} ——偏应力差等于 50% 峰值偏应力差时的轴向应变（‰）。

6 不排水抗剪强度应按下式计算：

$$c_u = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2} \quad (6.6.5-5)$$

式中： c_u ——不排水抗剪强度（kPa）。

6.6.6 不固结不排水剪三轴试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.5 的格式。

III 固结不排水剪试验

6.6.7 固结不排水剪试验可用于测定土的固结不排水抗剪强度参数和变形参数。

6.6.8 固结不排水剪试验操作步骤应符合下列规定：

1 装样应按下列步骤进行：

- 1) 对压力室底座充水，在底座上放置透水板，并依次放置试样、透水板及试样帽。在其周围应贴上 7 条～9 条浸湿的滤纸条，滤纸条宽度宜为试样直径的 $1/5 \sim 1/6$ ，滤纸条两端与透水板连接。砂土的试样安装应按本规程第 4.2.4 条的规定进行。
- 2) 将橡皮膜用承膜筒套在试样外，并用橡皮圈将橡皮膜下端与底座扎紧，打开孔隙水压力阀及量管阀，使水缓慢地从试样底部流入，排除试样与橡皮膜之间的气泡，关闭孔隙水压力阀和量管阀。
- 3) 打开排水阀，使水从试样帽缓慢流出，排除管路

中的气泡，并将试样帽置于试样顶端。排除顶端气泡，将橡皮膜扎紧在试样帽上。

- 4) 降低排水管，使其水面位于试样中心高程以下 20cm～40cm，吸出试样与橡皮膜之间多余水分，关闭排水管阀。
- 5) 装上压力室罩。安装时应先将活塞提升，防止碰撞试样，压力室罩安放后，将活塞对准试样帽中心，并均匀地旋紧螺丝。
- 6) 打开排气孔，向压力室充水，当压力室内快注满水时，降低进水速度，水从排气孔溢出时，关闭排气孔。
- 7) 上升升降台，当试样帽与活塞及测力计接近时，改用上升位移细调，使试样帽与活塞及测力计接触，然后将轴向测力计、轴向位移传感器或位移计的读数调零。

2 固结应按下列步骤进行：

- 1) 打开围压阀，施加所需的围压，围压大小应与工程的实际应力相适应，宜取不少于 4 个围压。
- 2) 打开孔隙水压力阀，测记稳定后的孔隙水压力读数，减去孔隙水压力计起始读数，即为围压与试样的初始孔隙水压力。
- 3) 打开排水管阀，按 0min、0.25min、1min、4min、9min、…时间测记排水读数及孔隙水压力计读数。固结度至少应达到 95%，固结过程中可随时绘制排水量 ΔV 与时间平方根或时间对数曲线及孔隙水压力消散度与时间对数曲线。当试样的主固结时间已掌握，也可不读取排水管和孔隙水压力的过程读数。
- 4) 固结完成后，关闭排水管阀，记录排水管和孔隙水压力的读数。开动试验机，到轴向力读数开始微动

时，记下轴向位移读数即固结下沉量 Δh_c 。然后将轴向力和轴向位移读数调零。

3 剪切应按下列步骤进行：

- 1) 黏性土的剪切应变速率宜为每分钟应变 0.05%～0.1%；粉土的剪切应变速率宜为每分钟应变 0.1%～0.5%。
- 2) 试样开始剪切。测力计、轴向变形、孔隙水压力的测记应符合本规程第 6.6.4 条第 2 款的规定。
- 3) 试验结束后应关闭电动机，下降升降台，打开排气孔，排去压力室内的水，拆除压力室罩，拭去试样周围的余水，小心脱去试样外的橡皮膜，描述破坏后形状。

6.6.9 固结不排水剪试验成果整理应符合下列规定：

1 试样固结后的高度应按下列式计算：

$$h_c = h_0 - \Delta h_c \quad (6.6.9-1)$$

式中： h_c ——试样固结后的高度（cm）；

h_0 ——试样的初始高度（cm）；

Δh_c ——固结下沉量，由轴向位移计测得（cm）。

2 试样固结后的体积应按下列式计算：

$$V_c = V_0 - \Delta V \quad (6.6.9-2)$$

式中： V_c ——试样固结后的体积（cm³）；

V_0 ——试样的初始体积（cm³）；

ΔV ——固结排水量（cm³）。

3 试样固结后的断面积应按下列式计算：

$$A_c = \frac{V_c}{h_c} \quad (6.6.9-3)$$

式中： A_c ——试样固结后的断面积（cm²）。

4 轴向应变应按下列式计算：

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_c} \times 100 \quad (6.6.9-4)$$

式中： ε_1 ——轴向应变（%）；

Δh_1 ——剪切过程中试样的高度变化（cm）。

5 试样剪切时的断面积应按下式计算：

$$A_a = \frac{A_c}{1 - 0.01\varepsilon_1} \quad (6.6.9-5)$$

式中： A_a ——试样剪切时的断面积（cm²）。

6 主应力差应按本规程公式（6.6.5-3）计算。

7 有效主应力比 σ'_1/σ'_3 应按下列公式计算：

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma'_3} + 1 \quad (6.6.9-6)$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad (6.6.9-7)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad (6.6.9-8)$$

式中： σ'_1 ——有效最大主应力（kPa）；

σ'_3 ——有效最小主应力（kPa）；

σ_1 ——最大主应力（kPa）；

σ_3 ——最小主应力（kPa）；

u ——孔隙水压力（kPa）。

8 宜以主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为纵坐标、轴向应变 ε_1 为横坐标，绘制关系曲线；宜以有效主应力比（ σ'_1/σ'_3 ）为纵坐标、轴向应变 ε_1 为横坐标，绘制关系曲线；宜以孔隙水压力 u 为纵坐标、轴向应变 ε_1 为横坐标，绘制关系曲线；宜以 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ 为纵坐标， $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ 为横坐标，绘制总应力路径关系曲线；宜以 $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$ 为纵坐标， $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ 为横坐标，绘制有效应力路径关系曲线。

9 在主应力差-轴向应变的关系曲线或有效主应力比-轴向应变的关系曲线上，可取峰值点作为破坏点。如无峰值，应以应

力路径关系曲线的密集点或取 15% 轴向应变作为破坏点。经过论证也可根据工程情况选取适合的破坏标准。

10 宜以法向应力 σ 为横坐标, 剪应力 τ 为纵坐标。在横坐标上以 $\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2}$ 为圆心, $\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2}$ 为半径, 绘制破坏时的总应力圆, 作诸圆包线, 该包线的倾角为总应力内摩擦角 φ_{cu} , 包线在纵轴上的截距为总应力黏聚力 c_{cu} ; 在横坐标上以 $\frac{\sigma'_{1f} + \sigma'_{3f}}{2}$ 为圆心, $\frac{\sigma'_{1f} - \sigma'_{3f}}{2}$ 为半径, 绘制破坏时的有效应力圆, 作诸圆包线, 该包线的倾角为有效内摩擦角 φ' , 包线在纵轴上的截距为有效黏聚力 c' 。

注: 脚注 f 表示破坏状态。

6.6.10 固结不排水剪三轴试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.6 的格式。

IV 固结排水剪试验

6.6.11 固结排水剪试验可用于测定土的固结排水抗剪强度参数和变形参数。

6.6.12 固结排水剪试验步骤应符合下列规定:

- 1 装样应按本规程第 6.6.8 条第 1 款执行。
- 2 试样固结应按本规程第 6.6.8 条第 2 款执行。
- 3 试样剪切应按下列步骤进行:
 - 1) 在剪切过程中应打开排水阀。剪切速率应采用每分钟应变为 0.003%~0.012%。
 - 2) 试样开始剪切。测力计、轴向变形、孔隙水压力的测记应符合本规程第 6.6.4 条第 2 款规定。
 - 3) 试验结束后应关闭电动机, 下降升降台, 打开排气孔, 排去压力室内的水, 拆除压力室罩, 拭去试样周围的余水, 小心脱去试样外的橡皮膜, 描述破坏

后形状。

6.6.13 固结排水剪试验成果整理应符合下列规定：

- 1 试样固结后的高度应按本规程公式 (6.6.9-1) 计算。
- 2 试样固结后的体积应按本规程公式 (6.6.9-2) 计算。
- 3 试样固结后的断面积应按本规程公式 (6.6.9-3) 计算。
- 4 轴向应变应按本规程公式 (6.6.9-4) 计算。
- 5 体积应变应按下式计算：

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V_i}{V_c} \times 100 \quad (6.6.13-1)$$

式中： ϵ_v ——体积应变（%）；

ΔV_i ——剪切过程中试样的体积变化（ cm^3 ）。

- 6 试样剪切时的断面积应按下式计算：

$$A_a = \frac{V_c - \Delta V_i}{h_c - \Delta h_i} \quad (6.6.13-2)$$

式中： A_a ——试样剪切时的断面积（ cm^2 ）；

h_c ——试样固结后的高度（cm）；

Δh_i ——剪切过程中试样的高度变化（cm）。

- 7 主应力差应按本规程公式 (6.6.5-3) 计算。

- 8 有效主应力比应按本规程公式 (6.6.9-6) 计算。

9 宜以主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为纵坐标，以轴向应变 ϵ_1 为横坐标，绘制关系曲线；宜以体积应变 ϵ_v 为纵坐标，以轴向应变 ϵ_1 为横坐标，绘制关系曲线；宜以主应力比 (σ_1/σ_3) 为纵坐标，以轴向应变 ϵ_1 为横坐标，绘制关系曲线；宜以 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ 为纵坐标，以 $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ 为横坐标，绘制应力路径曲线。

- 10 破坏点的取值应符合本规程第 6.6.9 条第 9 款的规定。

11 应以法向应力 σ 为横坐标，以剪应力 τ 为纵坐标，在横坐标上以 $\frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2}$ 为圆心， $\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2}$ 为半径，绘制破坏时的应力

圆，作诸圆包线。该包线的倾角为内摩擦角 φ_d ，包线在纵轴上的截距为黏聚力 c_d 。

6.6.14 固结排水剪三轴试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.7 的格式。

V 一个试样多级加荷试验

6.6.15 一个试样多级加荷试验可用于无法取得多个均匀试样的原状土。

6.6.16 固结不排水剪试验步骤应符合下列规定：

1 装样应按本规程第 6.6.8 条第 1 款执行。

2 施加第一级围压，试样固结应按本规程第 6.6.8 条第 2 款执行，试样的剪切应符合本规程第 6.6.8 条第 3 款的规定。第一级剪切完成后，卸除轴向压力，待孔隙水压力稳定后施加第二级围压，进行排水固结。第二级和以后各级围压应大于前一级围压下破坏状态的最大主应力。

3 固结完成后进行第二级围压下的剪切。并依次进行第三级围压下的固结和剪切，累计的轴向应变不应超过 20%。

4 试验结束后，卸除围压，关闭围压阀，拆除压力室罩，拆除试样。

6.6.17 固结不排水剪试验成果整理应按本规程第 6.6.9 条执行。

6.7 无侧限抗压强度试验

6.7.1 无侧限抗压强度试验可用于饱和细粒土。

6.7.2 试验加荷方式应为应变控制式。

6.7.3 试验应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

6.8 三轴蠕变试验

6.8.1 三轴蠕变试验宜采用应力控制式加载，可用于测定土的

蠕变参数。

6.8.2 试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 三轴仪应主要包括三轴压力室、轴向加压设备、围压控制系统、反压控制系统。

2 量测设备应包括孔隙水压力、轴向力、轴向变形和体积变化量测系统。

3 试样直径可为 39.1mm、61.8mm 及 101.0mm，试样高度与直径之比应为 2.0~2.5。

6.8.3 三轴蠕变试验装样应按本规程第 6.6.8 条第 1 款执行；固结应按本规程第 6.6.8 条第 2 款执行；试验期间应保持试验室温度相对稳定；蠕变试验步骤应符合下列规定：

1 将轴向位移计、体变管水位读数等调零。

2 排水蠕变时，应打开排水管阀，加载速率应使孔隙水压力消散为零；不排水蠕变时，应关闭排水管阀。

3 轴向加载到设定荷载值后，应立即记录时间、轴向位移计、体变管水位、孔隙水压力读数。在整个蠕变试验过程中，应保持围压和轴向应力不变。

4 每隔一定时间记录时间、温度、轴向位移计、体变管水位读数。试验第 1 小时读数时间可选 12s、30s、1min、2min、3min、5min、10min、30min、1h，在蠕变试验中期和后期可数小时或十余小时读数一次。

5 蠕变稳定标准可取每 24h 内轴向应变的变化量小于 0.05‰，或取 24h 的轴向应变小于累计轴向应变的 1‰~5‰。达到稳定标准后可结束试验。

6 蠕变试验可取 3 级~5 级围压，每个围压下可取 3 级~4 级应力水平。最大围压应与工程的实际应力一致。

6.8.4 试验成果整理应符合下列规定：

1 试样固结后的高度应按本规程公式 (6.6.9-1) 计算。

2 试样固结后的体积应按本规程公式 (6.6.9-2) 计算。

3 蠕变轴向应变、蠕变体积应变应按下列公式计算：

$$\varepsilon_{1t} = \frac{\Delta h_t}{h_c} \times 100 \quad (6.8.4-1)$$

$$\varepsilon_{vt} = \frac{\Delta V_t}{V_c} \times 100 \quad (6.8.4-2)$$

式中： ε_{1t} ——蠕变轴向应变（%）；

ε_{vt} ——蠕变体积应变（%）；

Δh_t ——剪切蠕变开始后到某时刻止试样的轴向变形（cm）；

ΔV_t ——剪切蠕变开始后到某时刻止试样的体积变化（cm³）；

h_c ——试样固结后的高度（cm）；

V_c ——试样固结后的体积（cm³）。

4 宜以时间为横坐标，以蠕变轴向应变和蠕变体积应变为纵坐标，绘制蠕变变形与时间的关系曲线。

6.8.5 三轴蠕变试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.8 的格式。

6.9 真三轴试验

6.9.1 真三轴试验可用于细粒土、砾类土和砂土，可分别采用不固结不排水剪、固结不排水剪和固结排水剪三种试验方法，可测得复杂应力状态和复杂应力路径下的抗剪强度参数和变形参数。

6.9.2 真三轴试验每组不应少于 4 个试样，同步施加最小主应力、中主应力、最大主应力，加载至试样破坏。每组试样的最小主应力宜按倍数增加，最小主应力的最大值宜根据工程实际荷载确定。

6.9.3 真三轴试验宜采用下列仪器设备：

1 真三轴仪（图 6.9.3）包括压力室、最大主应力加压系统、中主应力加压系统、最小主应力加压系统、反压力系统等部分。

2 量测设备包括最大主应力、中主应力、最小主应力方向的轴向力、轴向变形量测系统，体变量测系统和孔隙水压力量测系统。

3 附属设备包括对开成型筒、击实锤或振捣器、橡皮膜、电子台秤或电子天平、钢尺、秒表、瓷盘、烘箱等。

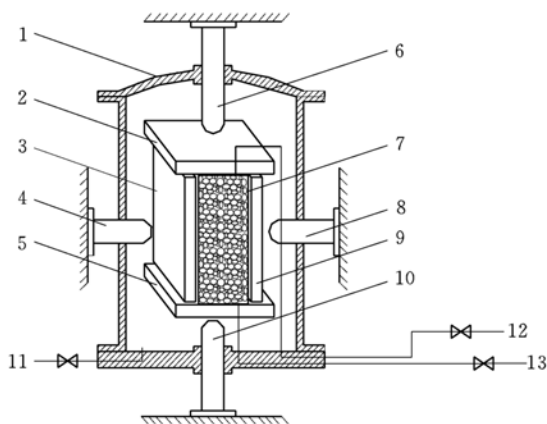


图 6.9.3 真三轴仪

- 1—压力室；2—含透水板的上加压板；3—左水平加压板；4—左水平加载系统；
5—含透水板的下加压板；6—上轴向加载系统；7—试样；8—右水平加载系统；9—右水平加压板；10—下轴向加载系统；11—接最小压力系统；12—反压/排水阀；13—进水阀

6.9.4 不固结不排水剪试验步骤应符合下列规定：

1 将透水板放在试样底座上，开进水阀，使试样底座透水板充水至无水泡逸出，关闭进水阀门。在底座上依次放置下透水板、试样、上透水板、试样帽。将橡皮膜套在试样外，将橡皮膜

下端与底座扎紧。开进水阀和排水阀，使无气水从试样帽缓慢流出以排出管路中的气泡，将橡皮膜上端与试样帽扎紧。

2 安装中主应力加压板，使其直立并紧靠试样中主应力方向两侧。安装压力室，旋紧压力室与底座连接螺栓。安装中主应力方向横梁，沿中主应力方向使试样与荷载传感器接触，当荷载传感器的读数变化时立即停机，然后将荷载传感器、位移传感器的读数调零。

3 打开压力室排气孔，向压力室注水，待注满水后关闭排气孔。

4 沿最大主应力方向使试样与荷载传感器接触，当荷载传感器的读数变化时立即停机，将荷载传感器、位移传感器的读数调整到零位。关闭进水阀和排水阀。

5 施加最小主应力至预定值，设定加载速率、应力路径、数据采集间隔时间后，施加中主应力和最大主应力，加载速率宜采用最大主应变速率控制，宜为 0.5%~1.0%。

6 当最大主应力方向的荷载出现峰值时，应继续剪切至最大主应变再增加 3%~5%，当最大主应力方向的荷载无峰值时，应剪切至最大主应变达到 15%。

7 记录试验过程中的荷载、变形、排水量、孔隙水压力等。试验结束后，按顺序卸除最大主应力、中主应力、最小主应力。

8 打开压力室排气孔和压力室排水阀，排去压力室内的水，卸除压力室罩和中主应力加压板，拭去试样周围余水，小心脱去试样外的橡皮膜，并对剪切后试样进行描述。

6.9.5 固结不排水剪试验步骤应符合下列规定：

1 试样的安装应符合本规程第 6.9.4 条第 1~4 款的要求。

2 关闭进水阀、排水阀，施加最小主应力至预定值，并保持恒定。打开排水阀，测记排水量、孔隙水压力。绘制固结

过程中排水量与时间、孔隙水压力与时间的关系曲线。固结完成标准宜为孔隙水压力消散 95% 且每小时体积应变不大于 0.05%。

3 固结完成后,按照中主应力方向、最大主应力方向的顺序使荷载传感器、活塞与试样接触。

4 测记最大主应力方向和中主应力方向位移,计算各方向固结变形量,测记排水量。

5 关闭排水阀。在控制程序中设定加载速率、应力路径、数据采集间隔,施加中主应力和最大主应力,开始剪切试验。加载速率宜采用最大主应变速率控制,对砂土宜为每分钟 0.5%~1.0%;对粉土宜为每分钟 0.1%~0.5%;对黏性土宜为每分钟 0.05%~0.1%。

6 数据记录及试验结束后的操作应按本规程第 6.9.4 条第 7 款和第 8 款执行。

6.9.6 固结排水剪试验步骤应符合下列规定:

1 试样的安装应符合本规程第 6.9.4 条第 1 款~第 4 款的要求。

2 试样的固结应符合本规程第 6.9.5 条第 2 款~第 4 款的要求。

3 剪切试验中打开排水阀,使试样保持排水条件。在控制程序中设定加载速率、应力路径、数据采集间隔,施加中主应力和最大主应力,开始剪切试验。

4 加载速率宜采用最大主应变速率控制,对砂土宜为每分钟 0.1%~0.5%;对粉土和黏性土宜为每分钟 0.003%~0.012%。

5 数据记录及试验结束后的操作应按本规程第 6.9.4 条第 7 款和第 8 款执行。

6.9.7 试验成果整理应符合下列规定:

1 试样的高度、面积和体积可按表 6.9.7 计算:

表 6.9.7 试样高度、面积和体积计算

项目	起始	固结后	剪切时校正值
试样高度 (cm)	H_0	$h_c = H_0 - (\Delta h_{1c} + \Delta h_{2c})$	—
最大主应变 $\epsilon_1 (\%)$	—	$\epsilon_{1c} = \frac{\Delta h_{1c} + \Delta h_{2c}}{H_0} \times 100$	$\epsilon_1 = \frac{\Delta h_{1i} + \Delta h_{2i}}{h_c} \times 100$
试样长度 (cm)	S_0	$s_c = S_0 - (\Delta s_{1c} + \Delta s_{2c})$	—
中主应变 $\epsilon_2 (\%)$	—	$\epsilon_{2c} = \frac{\Delta s_{1c} + \Delta s_{2c}}{S_0} \times 100$	$\epsilon_2 = \frac{\Delta s_{1i} + \Delta s_{2i}}{s_c} \times 100$
试样体积 (cm^3)	V_0	$V_c = V_0 - \Delta V_c$	—
最小主应变 $\epsilon_3 (\%)$	—	$\epsilon_{3c} = \frac{\Delta V_c}{V_0} \times 100 - \epsilon_{1c} - \epsilon_{2c}$	$\epsilon_3 = \frac{\Delta V_i}{V_0} \times 100 - \epsilon_1 - \epsilon_2$
试样宽度 (cm)	B_0	$b_c = \frac{100 - \epsilon_{3c}}{100} \times B_0$	—
最大主应力方向 试样面积 (cm^2)	A_{v0}	$A_{vc} = s_c \times b_c$	$A_v = s_c \times \frac{100 - \epsilon_2}{100} \times b_c \times \frac{100 - \epsilon_3}{100}$
中主应力方向 试样面积 (cm^2)	A_{s0}	$A_{sc} = h_c \times b_c$	$A_s = h_c \times \frac{100 - \epsilon_1}{100} \times b_c \times \frac{100 - \epsilon_3}{100}$

注： Δh_{1c} 是最大主应力方向试样上端固结位移量 (cm)； Δh_{2c} 是最大主应力方向试样下端固结位移量 (cm)； Δh_{1i} 是最大主应力方向试样上端剪切位移量 (cm)； Δh_{2i} 是最大主应力方向试样下端剪切位移量 (cm)； Δs_{1c} 是中主应力方向试样左侧固结位移量 (cm)； Δs_{2c} 是中主应力方向试样右侧固结位移量 (cm)； Δs_{1i} 是中主应力方向试样左侧剪切位移量 (cm)； Δs_{2i} 是中主应力方向试样右侧剪切位移量 (cm)； ΔV_c 是固结排水量 (cm^3)； ΔV_i 是实测试样剪切时排水量 (cm^3)。

2 最大主应力差应按式计算：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P_{v1} + P_{v2}}{2A_v} \times 10^4 \quad (6.9.7-1)$$

式中： σ_1 ——最大主应力 (kPa)；

σ_3 ——最小主应力 (kPa)；

P_{v1} ——最大主应力方向试样上端荷载传感器读数 (kN)；

P_{v2} ——最大主应力方向试样下端荷载传感器读数 (kN)；

A_v ——试样剪切时最大主应力方向的截面积 (cm^2)。

3 中主应力差应按下式计算：

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \frac{P_{s1} + P_{s2}}{2A_s} \times 10^4 \quad (6.9.7-2)$$

式中： σ_2 ——中主应力 (kPa)；

P_{s1} ——中主应力方向试样左侧荷载传感器读数 (kN)；

P_{s2} ——中主应力方向试样右侧荷载传感器读数 (kN)；

A_s ——试样剪切时中主应力方向的截面积 (cm^2)。

4 球应力与偏应力应按下列公式计算：

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (6.9.7-3)$$

$$q = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (6.9.7-4)$$

式中： p ——球应力 (kPa)；

q ——偏应力 (kPa)。

5 中主应力参数应按下式计算：

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (6.9.7-5)$$

式中： b ——中主应力参数。

6 有效主应力比应按下列公式计算：

$$\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma'_3} + 1 \quad (6.9.7-6)$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad (6.9.7-7)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad (6.9.7-8)$$

式中： σ'_1 ——有效最大主应力 (kPa)；

σ'_3 ——有效最小主应力 (kPa)；

u ——孔隙水压力 (kPa)。

7 宜以最大主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 为纵坐标，以最大主应变 ϵ_1 为横坐标，绘制关系曲线；宜以中主应力差 $\sigma_2 - \sigma_3$ 为纵坐标，

以中主应变 ϵ_2 为横坐标, 绘制关系曲线; 宜以孔隙压力 u 为纵坐标, 以最大主应变 ϵ_1 为横坐标, 绘制关系曲线。

8 在最大主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与最大主应变 ϵ_1 的关系曲线上, 宜以峰值点为破坏点; 无峰值时, 宜取一定最大主应变时的主应力差值点作为破坏点。

9 可采用摩尔库伦破坏准则整理抗剪强度参数。

6.9.8 真三轴试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.9 的格式。

6.10 振动三轴试验

6.10.1 振动三轴试验可用于饱和细粒土和砂土, 可测定饱和土体在动应力作用下的动强度、动应力-应变关系、动弹性模量、阻尼比及残余变形等。

6.10.2 振动三轴试验仪器设备应符合下列规定:

1 振动三轴仪包括主机、静力控制系统、轴向动力控制系统、量测系统、数据采集和处理系统, 按激振方式可采用电机式、惯性力式、电磁式、电液式及气动式等。

2 主机包括压力室和试样底座。

3 静力控制系统包括压力源、调压阀和压力表, 用于施加围压、反压。

4 轴向动力控制系统包括压力源、伺服控制器、伺服阀。要求激振波形良好, 拉压两半周幅值和持时基本相等, 相差应小于 10%。

5 量测系统包括轴向载荷、轴向位移及孔隙水压力传感器等。

6.10.3 细粒土试样安装应按本规程第 6.6.8 条第 1 款执行, 砂土试样安装应按本规程第 4.2.4 条第 1 款执行。

6.10.4 试样固结应符合下列规定:

1 等向固结应先对试样施加 20kPa 的侧压力, 然后逐级施

加均等的周围压力和轴向压力，直到周围压力和轴向压力相等并达到预定压力。

2 不等向固结应在等向固结变形稳定后，逐级增加轴向压力，直到达到预定的轴向压力，加压时勿使试样产生过大的变形。

3 施加压力后打开排水阀或体变管阀和反压力阀，使试样排水固结。固结稳定标准，对细粒土试样，1h 内固结排水量变化不大于 0.1cm^3 ；对砂土试样，等向固结时关闭排水阀后 5min 内孔隙压力不上升，不等向固结时 5min 内轴向变形不大于 0.005mm 。

6.10.5 动强度试验步骤应符合下列规定：

1 动强度试验宜采用固结不排水试验。

2 振动前，变形传感器和孔隙水压力传感器读数应调零。

3 试样安装并固结完成后关闭排水阀，设定试验方案，包括振动荷载幅值和振动频率。试验宜采用正弦波激振。

4 启动激振器，打开采集器，记录荷载、变形和孔隙水压力的变化过程，达到破坏标准后再振 5 周~10 周可停止试验。试样的破坏标准，对于等压固结试验，可取双幅轴向动应变极大值与极小值之差达到 5%；对于偏压固结试验，可取单幅轴向总动应变峰值达到 5%；对于可液化土的抗液化强度试验，可以初始液化作为破坏标准。

5 试验时对同一密度的试样，可选择 1 个~3 个固结应力比；同一固结应力比下，可选择 1 个~3 个不同的侧向压力；每一侧向压力下，宜选择 4 个~6 个的动剪应力水平，可分别选择 10 周、20 周~30 周和 100 周等不同的振动破坏。

6.10.6 动强度试验成果整理应符合下列规定：

1 应力状态指标应采用下列方法计算：

1) 振前试样 45° 斜面上静应力应按下列公式计算：

$$\sigma'_0 = \frac{1}{2}(\sigma_{1c} + \sigma_{3c}) - u_0 \quad (6.10.6-1)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{2}(\sigma_{1c} - \sigma_{3c}) \quad (6.10.6-2)$$

式中： σ'_0 ——振前试样 45°斜面上的有效法向固结应力 (kPa)；

σ_{1c} ——初始轴向固结应力 (kPa)；

σ_{3c} ——初始侧向固结应力 (kPa)；

u_0 ——初始静孔隙水压力 (kPa)；

τ_0 ——振前试样 45°斜面上的剪应力 (kPa)。

2) 初始剪应力比应按下式计算：

$$\alpha = \frac{\tau_0}{\sigma'_0} \quad (6.10.6-3)$$

式中： α ——初始剪应力比。

3) 固结应力比应按下式计算：

$$K_c = \frac{\sigma'_{1c}}{\sigma'_{3c}} = \frac{\sigma_{1c} - u_0}{\sigma_{3c} - u_0} \quad (6.10.6-4)$$

式中： K_c ——固结应力比；

σ'_{1c} ——初始有效轴向固结应力 (kPa)；

σ'_{3c} ——初始有效侧向固结应力 (kPa)；

u_0 ——初始孔隙水应力 (kPa)。

4) 轴向动应力应按下式计算：

$$\sigma_d = \frac{W_d}{A_c} \times 10 \quad (6.10.6-5)$$

式中： σ_d ——轴向动应力 (kPa)；

W_d ——轴向动荷载 (N)；

A_c ——试样固结后横截面积 (cm²)。

5) 轴向动应变应按下式计算：

$$\epsilon_d = \frac{\Delta h_d}{h_c} \times 100 \quad (6.10.6-6)$$

式中： ϵ_d ——轴向动应变 (%)；

Δh_d ——轴向动变形 (mm);

h_c ——试样固结后振前高度 (mm)。

6) 试样 45° 斜面上的动剪应力应按式计算:

$$\tau_d = \frac{1}{2} \sigma_d \quad (6.10.6-7)$$

式中: τ_d ——试样 45° 斜面上的动剪应力 (kPa)。

7) 试样 45° 斜面上的总剪应力应按式计算:

$$\tau_{sd} = \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c} + \sigma_d}{2} = \tau_0 + \tau_d \quad (6.10.6-8)$$

式中: τ_{sd} ——试样 45° 斜面上的总剪应力 (kPa)。

8) 当饱和粉土或砂土液化时, 液化应力比应按式计算:

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_0} = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_0} \quad (6.10.6-9)$$

2 动强度试验曲线可按下列要求绘制:

1) 以破坏振次 N_f 的对数值为横坐标, 动剪应力 τ_d 为纵坐标, 在半对数坐标上绘制不同侧向固结应力下的动剪应力 τ_d 与破坏振次 N_f 的关系曲线。

2) 当饱和粉土或砂土液化时, 以破坏振次 N_f 的对数值为横坐标, 液化应力比 $\frac{\sigma_d}{2\sigma'_0}$ 为纵坐标, 在半对数坐标上绘制不同固结应力比下的液化应力比 $\frac{\sigma_d}{2\sigma'_0}$ 与破坏振次 N_f 的关系曲线。

3) 以破坏振次 N_f 的对数值为横坐标, 动孔隙水压力 u_d 为纵坐标, 在半对数坐标上绘制动孔隙水压力 u_d 与破坏振次 N_f 的关系曲线。动孔隙水压力 u_d 可取记录时程曲线上的峰值; 也可根据工程需要, 取残余动孔隙水压力值。

4) 以振前试样 45° 斜面上的有效法向固结应力 σ'_0 为横坐标, 振动破坏时试样 45° 斜面上的总剪应力 τ_{sd} 为

纵坐标，绘制给定振次下，不同初始剪应力比时的总剪应力 τ_{sd} 与有效法向固结应力 σ'_0 的关系曲线。

3 抗液化强度试验曲线可参照上述动强度试验曲线的规定绘制。

6.10.7 动弹性模量和阻尼比试验应符合下列规定：

1 动弹性模量和阻尼比试验宜采用固结不排水试验。

2 试样安装前，变形传感器和孔隙水压力传感器读数应调零。

3 动应力由小到大逐级增加，后一级动应力可设定为前一级的 2 倍，每级的振动次数不宜大于 10 次，记录振动时轴向动荷载、轴向动变形和孔隙水压力，每个试样宜分为 4 级～5 级逐级施加动应力。

4 同一密度的试样，在同一固结应力比下，宜取 1 个～5 个不同的侧向压力。

6.10.8 动弹性模量和阻尼比试验成果整理应符合下列规定：

1 动弹性模量应按下式计算：

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} \times 0.1 \quad (6.10.8-1)$$

式中： E_d ——动弹性模量（MPa）。

2 动剪切模量应按下式计算：

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\mu)} \quad (6.10.8-2)$$

式中： G_d ——动剪切模量（MPa）；

μ ——泊松比。

3 阻尼比应按下式计算：

$$\lambda = \frac{A}{4\pi A_T} \quad (6.10.8-3)$$

式中： λ ——阻尼比；

A ——动应力-应变滞回圈（图 6.10.8）ABCD 所包围的

面积 (kPa);

A_T ——三角形 AOE 的面积 (kPa)。

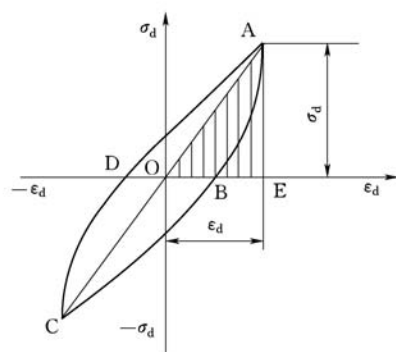


图 6.10.8 动应力-应变滞回圈示意图

4 动弹性模量和阻尼比试验曲线可按下列方法绘制:

- 1) 以轴向动应变 ϵ_d 为横坐标, 轴向动应力 σ_d 为纵坐标, 绘制轴向动应力 σ_d 与轴向动应变 ϵ_d 的关系曲线。
- 2) 以轴向动应变 ϵ_d 为横坐标, 动弹性模量倒数 $1/E_d$ 为纵坐标, 绘制动弹性模量倒数 $1/E_d$ 与轴向动应变 ϵ_d 的关系曲线, 取曲线线性拟合的截距值的倒数为最大动弹性模量。
- 3) 以轴向动应变 ϵ_d 为横坐标, 动弹性模量 E_d 为纵坐标, 绘制动弹性模量 E_d 与轴向动应变 ϵ_d 的关系曲线。
- 4) 以轴向动应变 ϵ_d 为横坐标, 阻尼比 λ 为纵坐标, 绘制阻尼比 λ 与轴向动应变 ϵ_d 的关系曲线。

6.10.9 动残余变形特性试验应符合下列规定:

- 1 动残余变形特性试验应采用固结排水试验, 试验中保持排水阀开启。

2 试样固结完成后,按设定的振动波形、动荷载幅值、激励频率、振动次数等进行试验,可采用正弦波激振。

3 对同一密度的试样,可选择1个~3个固结应力比。在同一固结应力比下,可选择1个~3个侧向压力。每一侧向压力可采用3个~5个动剪应力水平,按设定参数进行动残余变形特性试验。

6.10.10 动残余变形特性试验成果整理应符合下列要求:

1 可根据振动三轴试验中的排水量计算动残余体积应变;可根据振动三轴试验中的轴向变形量计算动残余轴应变和动残余剪应变。

2 计算轴向应力、轴向应变、体应变。

3 以振次的对数值为横坐标,动残余体积应变为纵坐标,在半对数坐标上绘制动残余体积应变和振次的关系曲线。

4 以振次的对数值为横坐标,动残余轴向应变为纵坐标,在半对数坐标上绘制动残余轴向应变与振次的关系曲线。

6.10.11 测定动强度与液化的振动三轴试验记录表可采用本规程附录C中表C.0.10的格式,测定动模量与阻尼比的振动三轴试验记录表可采用本规程附录C中表C.0.11的格式。

6.11 动单剪试验

6.11.1 动单剪试验可用于细粒土、砾类土和砂土,动单剪试验可采用不排水剪切和排水剪切两种方式。不排水剪切可用于黏性土、粉土、砂土,排水剪切可用于砂土、粉土。可测定土体的动剪应力-剪应变关系、动剪切模量、阻尼比和动强度。

6.11.2 伺服控制式动单剪仪(图6.11.2)应主要包括主机、竖向控制系统、横向剪切控制系统、量测系统、数据采集和处理系统。

6.11.3 试样安装应符合下列要求:

1 对试样底座充水,在底座上放置透水板。

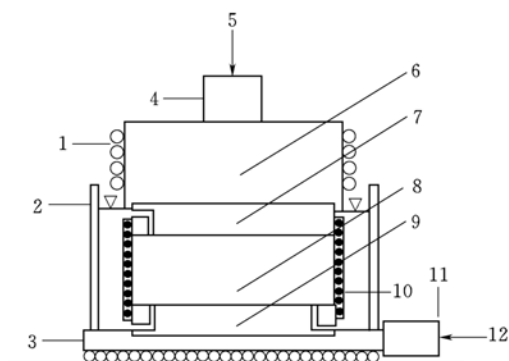


图 6.11.2 伺服控制式动单剪仪

- 1—支撑轴承；2—水槽；3—剪切滑动盘；4—竖向力测量系统；5—竖向力；
6—轴向加载活塞；7—上剪切板；8—土样；9—下剪切板；10—侧向
约束环/侧限加筋橡皮膜；11—剪切力测量系统；12—剪切力

2 将橡皮膜下端与底座扎紧，在试样和乳胶膜外面安装约束环并固定，将制备好的试样压入，在试样顶部顺序放置透水板 and 试样帽，并将橡皮膜与试样帽扎紧。

3 砂土扰动样的试样安装，应按本规程第 4.2.7 条执行。

4 启动控制程序，使法向活塞下降与试样帽接触。将法向荷载传感器、法向位移传感器、剪切力荷载传感器、剪切力位移传感器的读数调零。

6.11.4 试样固结应符合下列规定：

1 在控制界面上进行固结设置，对试样施加法向压力，应分级施加并在最后一级压力下保持恒定。

2 可绘制法向应变与时间关系曲线。

3 固结稳定标准宜取法向应变小于 0.05%/h。

6.11.5 动剪切模量和阻尼比试验应符合下列规定：

1 固结完成后对荷载传感器、位移传感器读数调零。

2 宜根据工程实际选择排水条件。

3 设置振幅、频率、波形、振次等动态参数和试验结束条件。波形可采用正弦波，频率可按荷载特征确定。

4 宜逐级施加动应力幅，每个试样宜选择 4 级～5 级的动应力幅，后一级的动应力幅值可控制为前一级的 2 倍左右，每级的振动次数不宜大于 5 次。

5 同一干密度的试样，宜选择 1 个～3 个法向压力。

6 试验结束后拆除位移计，排掉水槽内的水，依次卸除切向力和法向压力。

6.11.6 动强度试验宜符合下列规定：

1 固结完成后对荷载传感器、位移传感器读数调零。

2 宜根据工程实际选择排水条件。

3 设置振幅、频率、波形、振次等动态参数和试验结束条件。波形可采用正弦波，频率可按荷载特征确定。

4 同一干密度的试样，宜选择 1 个～3 个法向压力。同一法向压力下，宜采用 4 个试样，可选择 10 周、20 周、50 周、100 周左右的破坏周次进行动强度试验。试样的破坏标准，可取总动剪应变达到 5%，也可根据具体工程情况选取。当试样达到破坏标准后，可再振 5 周～10 周。

5 试验结束后拆除位移计，排掉水槽内的水，依次卸除切向力和法向压力。

6.11.7 动单剪试验成果整理宜符合下列规定：

1 法向压力宜按下式计算：

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A_s} \times 10 \quad (6.11.7-1)$$

式中： σ_n ——法向压力（kPa）；

F_n ——法向力（N）；

A_s ——试样截面积（cm²）。

2 法向应变宜按下式计算：

$$\epsilon_d = \frac{\Delta h_d}{h_d} \times 100 \quad (6.11.7-2)$$

式中： ϵ_d ——法向应变（%）；

Δh_d ——法向位移（mm）；

h_d ——试样固结后的高度（mm）。

3 动剪应力宜按下式计算：

$$\tau_d = \frac{F_\tau}{A_s} \times 10 \quad (6.11.7-3)$$

式中： τ_d ——动剪应力（kPa）；

F_τ ——动剪切荷载（N）。

4 动剪应变（图 6.11.7-1）宜按下式计算：

$$\gamma_d = \tan \theta \times 100 = \frac{\Delta h_\tau}{h_d} \times 100 \quad (6.11.7-4)$$

式中： γ_d ——动剪应变（%）；

Δh_τ ——切向动位移（mm）；

θ ——试样剪切后倾斜面与垂直面的夹角。

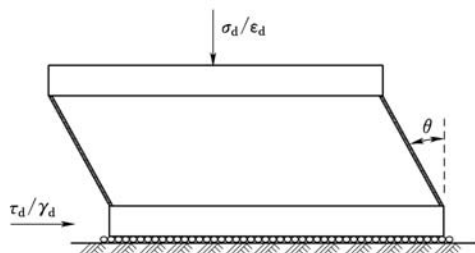


图 6.11.7-1 动剪应变

5 动剪模量宜按下式计算：

$$G_\tau = \frac{\tau_d}{\gamma_d} \times 0.1 \quad (6.11.7-5)$$

式中： G_τ ——动剪模量（MPa）。

6 阻尼比宜按下式计算：

$$\lambda_\tau = \frac{1}{4\pi} \frac{A}{A_t} \quad (6.11.7-6)$$

式中：A——应力应变滞回圈（图 6.11.7-2）ABCD 的面积（kPa）；

A_t ——三角形 OAE 的面积（kPa）。

7 宜以动剪应变为横坐标，以动剪模量为纵坐标，绘制不同法向压力下动剪模量与动剪应变的关系曲线；宜以动剪应变为横坐标，以阻尼比为纵坐标，绘制不同法向压力下阻尼比与动剪应变的关系曲线。

8 宜以破坏振次 N_f 的对数值为横坐标，以动剪应力比 τ_d/σ_n 为纵坐标，在半对数坐标系下绘制不同法向压力下的动剪应力比与破坏振次的关系曲线。

6.11.8 动单剪试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.12 的格式。

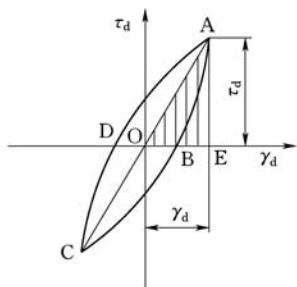


图 6.11.7-2 应力应变滞回圈

6.12 共振柱试验

6.12.1 共振柱试验可用于饱和细粒土和砂土，可测定饱和土体在周期荷载作用下的动剪切模量、动弹性模量和阻尼比等，试样的动轴向应变和动剪应变范围应为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 。

6.12.2 共振柱试验仪按试样约束条件，可分别采用一端固定一端自由，或一端固定一端用弹簧和阻尼器支承；按激励方式可分别采用稳态强迫振动法或自由振动法；按振动方式可分别采用扭转振动或纵向振动。

6.12.3 共振柱试验宜采用下列仪器设备：

1 压力室内部置放激励器和加速度计。压力室底座和试样上压盖板宜具有辐射状的凸条。

2 静力控制系统应符合本规程第 6.10.2 条第 3 款的规定。

3 激振控制系统宜包括信号发生器、功率放大器、A/D 转换器和计算机。

4 量测系统宜包括加速度计、电荷放大器、频率计、示波器或 A/D 转换器和计算机。

6.12.4 试样安装步骤应符合下列要求：

1 打开量管阀，使试样底座充水，当溢出的水不含气泡时，关闭量管阀，在底座透水板上放湿滤纸。

2 细粒土装样时，应先将试样放在底座上，并压入底座上的凸条中使试样固定，再按本规程第 6.6.8 条第 1 款执行。砂土试样安装应按本规程第 4.2.4 条执行。

3 对扭转振动，将加速度计和激振驱动系统安装在相应位置，翻起乳胶膜并扎紧在上压盖上。

4 对轴向振动，将加速度计垂直固定于上压盖上，将上压盖与激振器相连。当上压盖上下活动自如时，垂直置于试样上端，翻起乳胶膜并扎紧在上压盖上。

5 拆除对开圆模，装上压力室外罩。

6.12.5 试样固结应按本规程第 6.6.8 条第 2 款执行。

6.12.6 稳态强迫振动法试验步骤应符合下列规定：

1 开启示波器、电荷放大器和频率计电源，进行数据采集。

2 由低频连续增大激振频率，直至系统发生共振，记录共振频率、动轴向应变或动剪应变。

3 阻尼比测定时，当系统共振后，继续增大激振频率，振幅逐渐减小，测记每一激振频率和相应的振幅电压值。继续测记 7 组～10 组数据，关闭仪器电源。

4 宜逐级施加动应变幅或动应力幅进行测试，后一级的振幅可控制为前一级的 2 倍。在同一试样上选用允许施加的动应变幅或动应力幅的级数时，应避免孔隙水压力明显升高。

5 卸除压力，关闭仪器电源，取下压力室罩，拆除试样，用清水反复清洗仪器设备。

6.12.7 自由振动法试验步骤应符合下列规定：

- 1 开启电荷放大器电源预热。
- 2 对试样施加瞬时扭矩后立即卸除，使试样自由振动，得到振幅衰减曲线。
- 3 宜逐级施加动应变幅或动应力幅进行测试，后一级的振幅可控制为前一级的 2 倍。在每一级激振力振动完成后，逐级增大激振力，测得试样在各级应变幅值下的模量和阻尼比。
- 4 卸除压力，关闭仪器电源，取下压力室外罩，拆除试样，用清水反复清洗仪器设备。

6.12.8 试验成果整理应符合下列规定：

- 1 试样的动应变应采用下列方法计算：
 - 1) 动剪应变应按下列公式计算：

$$\gamma = \frac{A_d d_c}{3d_1 h_c} \times 100 \quad (6.12.8-1)$$

式中： γ ——动剪应变（%）；

A_d ——动剪切位移（cm）；

d_1 ——加速度计到试样轴线的距离（cm）；

d_c ——试样固结后的直径（cm）；

h_c ——试样固结后的高度（cm）。

- 2) 动轴向应变应按下列公式计算：

$$\epsilon_d = \frac{\Delta h_d}{h_c} \times 100 \quad (6.12.8-2)$$

式中： ϵ_d ——动轴向应变（%）；

Δh_d ——动轴向位移（cm）。

- 2 扭转共振时的动剪切模量应按下列公式计算：

$$G_d = \left(\frac{2\pi f_{nt} h_c}{\beta_s} \right)^2 \rho_0 \times 10^{-4} \quad (6.12.8-3)$$

式中： G_d ——动剪切模量（kPa）；

f_{nt} ——有试样时实测的扭转振动共振频率（Hz）；

ρ_0 ——试样天然密度 (g/cm^3);

β_s ——扭转无量纲频率因数。

3 根据试样的约束条件, 扭转无量纲频率因数应采用下列方法计算:

1) 无弹簧支承时的无量纲频率因数, 应按下式计算:

$$\beta_s \tan \beta_s = \frac{I_0}{I_t} = \frac{m_0 d^2}{8 I_t} \quad (6.12.8-4)$$

式中: I_0 ——试样的转动惯量 ($\text{g} \cdot \text{cm}^2$);

I_t ——试样顶端附加物的转动惯量 ($\text{g} \cdot \text{cm}^2$);

d ——试样直径 (cm);

m_0 ——试样质量 (g)。

2) 有弹簧支承时的无量纲频率因数, 应按下式计算:

$$\beta_s \tan \beta_s = \frac{I_0}{I_t} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{f_{0t}}{f_{nt}} \right)^2 \right]} \quad (6.12.8-5)$$

式中: f_{0t} ——无试样时实测的扭转振动共振频率 (Hz)。

4 轴向共振时的动弹性模量应按下式计算:

$$E_d = \left(\frac{2\pi f_{nt} h_c}{\beta_L} \right)^2 \rho_0 \times 10^{-4} \quad (6.12.8-6)$$

式中: E_d ——动弹性模量 (kPa);

f_{nt} ——有试样时实测的纵向振动共振频率 (Hz);

β_L ——纵向振动无量纲频率因数。

5 根据试样的约束条件, 纵向振动无量纲频率因数应采用下列方法计算:

1) 无弹簧支承时的无量纲频率因数应按下式计算:

$$\beta_L \tan \beta_L = \frac{m_0}{m_t} \quad (6.12.8-7)$$

式中: m_0 ——试样的质量 (g);

m_t ——试样顶端附加物的质量 (g)。

2) 有弹簧支承时的无量纲频率因数应按下式计算:

$$\beta_L \tan \beta_L = \frac{m_0}{m_1} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{f_{0L}}{f_{nL}} \right)^2 \right]} \quad (6.12.8-8)$$

式中: f_{0L} ——无试样时实测的纵向振动共振频率 (Hz)。

6 阻尼比应采用下列方法计算:

1) 无弹簧支承自由振动时的阻尼比应按下式计算:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{N} \ln \frac{A_1}{A_{N+1}} \quad (6.12.8-9)$$

式中: λ ——阻尼比;

N ——计算所取的振动次数, 取 N 小于或等于 10;

A_1 ——停止激振后第 1 周振动的振幅 (mm);

A_{N+1} ——停止激振后第 $N+1$ 周振动的振幅 (mm)。

2) 无弹簧支承稳态强迫振动时的阻尼比应按下式计算:

$$\lambda = \frac{1}{2} \left(\frac{f_2 - f_1}{f_n} \right) \quad (6.12.8-10)$$

式中: f_1 、 f_2 ——分别为稳态强迫振动振幅与频率关系曲线 (图 6.12.8) 上 0.707 倍最大振幅值所对应的频率 (Hz);

f_n ——最大振幅值所对应的频率 (Hz)。

3) 有弹簧支承自由扭转振动时的阻尼比应按下列公式计算:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \times [\delta_t(1+s_t) - \delta_{0t}s_t] \quad (6.12.8-11)$$

$$s_t = \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \left(\frac{f_{0t}\beta_s}{f_{nt}} \right)^2 \quad (6.12.8-12)$$

式中: δ_t 、 δ_{0t} ——有试样和无试样时系统扭转振动时的对数衰减率;

s_t ——扭转振动时的能量比。

4) 有弹簧支承自由纵向振动时的阻尼比应按下列公式计算:

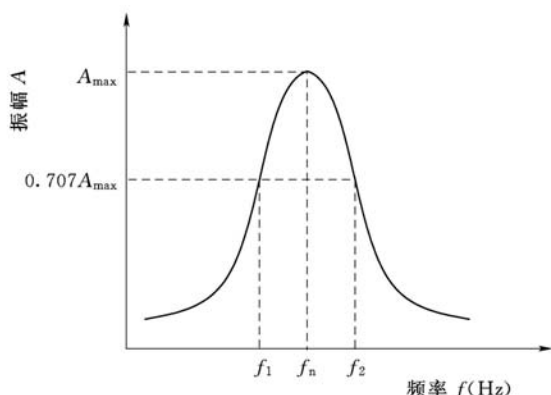


图 6.12.8 稳态强迫振动振幅与频率关系曲线

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \times [\delta_l(1+s_l) - \delta_{ol}s_l] \quad (6.12.8-13)$$

$$s_l = \left(\frac{m_1}{m_0} \right) \left(\frac{f_{ol}\beta_L}{f_{nl}} \right)^2 \quad (6.12.8-14)$$

式中： δ_l 、 δ_{ol} ——有试样和无试样时系统纵向振动时的对数衰减率；

s_l ——纵向振动时的能量比。

7 宜以动剪应变 γ 的对数值为横坐标，动剪切模量 G_d 为纵坐标，在半对数坐标上绘制不同围压下动剪切模量 G_d 与动剪应变 γ 的关系曲线，取纵轴上的截距作为该级压力下的最大动剪切模量 $G_{d \max}$ 。

8 宜以轴向动应变 ϵ_d 的对数值为横坐标，动弹性模量 E_d 为纵坐标，在半对数坐标上绘制不同围压下动弹性模量 E_d 与轴向动应变 ϵ_d 的关系曲线，取纵轴上的截距作为该级压力下的最大动弹性模量 $E_{d \max}$ 。

9 宜以动剪应变 γ 的对数值为横坐标，动剪切模量比 $G_d/G_{d \max}$ 为纵坐标，在半对数坐标上绘制不同围压下动剪切模量比 $G_d/G_{d \max}$ 与动剪应变 γ 的归一化曲线。

10 宜以轴向动应变 ϵ_d 的对数值为横坐标，动弹性模量比 $E_d/E_{d\max}$ 为纵坐标，在半对数坐标上绘制不同围压下动弹性模量比 $E_d/E_{d\max}$ 与轴向动应变 ϵ_d 的归一化曲线。

11 宜以围压 σ_3 的对数值为横坐标，最大动剪切模量 $G_{d\max}$ 的对数值为纵坐标，在双对数坐标上绘制最大动剪切模量 $G_{d\max}$ 与围压 σ_3 的关系曲线，曲线表达式为：

$$G_{d\max} = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (6.12.8-15)$$

式中：K——当 σ_3 等于 p_a 时的 $G_{d\max}$ 值；

p_a ——标准大气压值 (kPa)；

σ_3 ——围压值 (kPa)；

n ——直线斜率。

12 宜以动剪应变 γ 或轴向动应变 ϵ_d 的对数值为横坐标，阻尼比 λ 为纵坐标，在半对数坐标上绘制动阻尼比 λ 与动剪应变 γ 或轴向动应变 ϵ_d 的关系曲线。

6.12.9 带弹簧和阻尼器支承端扭转共振柱的共振柱试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.13 的格式；带弹簧和阻尼器支承端纵向振动共振柱的共振柱试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.14 的格式；自由端扭转共振柱的共振柱试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.15 的格式；自由端纵向振动共振柱的共振柱试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.16 的格式。

6.13 空心圆柱动扭剪试验

6.13.1 空心圆柱动扭剪试验可用于饱和细粒土和粒径小于 2mm 的砂土，可测定饱和土体在主应力轴旋转等复杂应力路径下的动应力-应变关系、动强度、动剪切模量、动弹性模量和阻尼比等，试样的应变范围应大于 10^{-4} 。

6.13.2 空心圆柱动扭剪试验可采用下列仪器设备：

1 空心圆柱扭剪仪（图 6.13.2），可由水压伺服控制加载

系统、控制系统、采集系统、内压力室、外压力室及伺服主机系统组成。

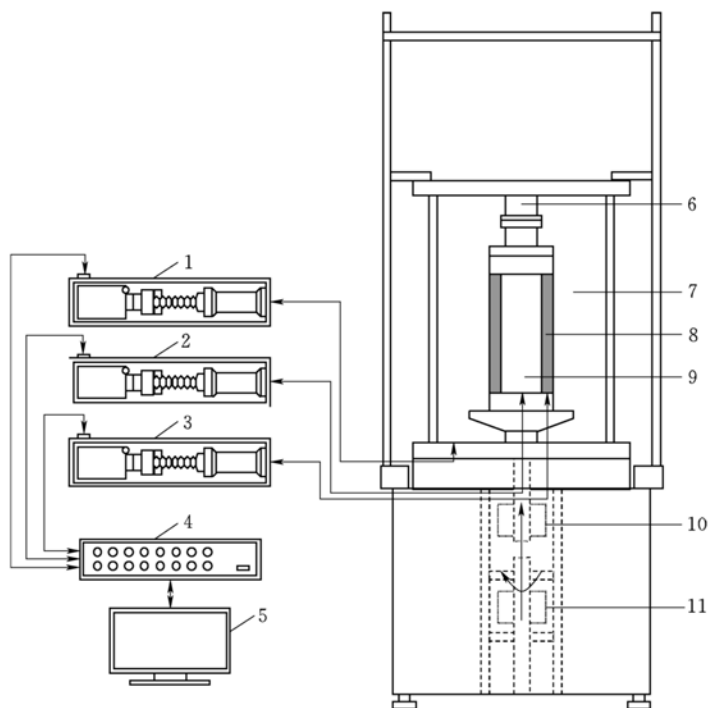


图 6.13.2 空心圆柱扭剪仪示意图

- 1—外压伺服控制加载系统；2—内压伺服控制加载系统；3—反压控制系统；
4—数据控制与采集系统；5—计算机控制系统；6—轴力/扭矩耦合传感器；
7—外压力室；8—空心圆柱试样；9—内压力室；10—轴力或轴向
位移控制系统；11—扭矩或扭转角度控制系统

2 原状黏性土空心圆柱样制备装置，包括黏性土空心圆柱试样切样台、黏性土空心圆柱试样内壁切削器；扰动黏性土空心圆柱样制备装置，包括扰动黏性土空心圆柱试样真空负压制备装置；粉土和砂土空心圆柱样制备装置，包括扰动无黏性土空心圆

柱试样成样装置、扰动无黏性土空心圆柱试样击实器等。

3 真空饱和设备，包括真空饱和缸、真空度调节阀、真空泵、过气留水缸、无气水缸。

4 搅拌机、天平、长颈漏斗。

6.13.3 空心圆柱试样的内、外径之比不宜小于 0.6，高度与外径之比宜在 1.5~2.2 之间。

6.13.4 原状和扰动黏性土空心圆柱试样的安装应符合下列规定：

1 压力室外试样的安装宜按下列步骤进行：

- 1) 将内膜底部牢固嵌入基座，注入无气水，通过挤压检查内膜表面是否渗水，若有渗水，卸下重新安装。
- 2) 安装试样，将透水板穿过内膜固定在基座上，并贴上环形滤纸，再将试样穿过内膜置于透水板上，在试样周围贴上 6 条浸湿的滤纸条，滤纸条宽度宜为试样直径的 $1/6 \sim 1/5$ 。
- 3) 安装外膜，将外膜底部紧扎在试样基座外壁上。
- 4) 安装顶盖时避免对试样产生竖向扰动。
- 5) 外膜翻上顶盖外壁并扎紧，将内膜穿过顶盖内壁向外翻出并扎紧，向内腔注满无气水。
- 6) 安装帽盖，将螺栓拧紧固定。

2 压力室内试样的安装宜按下列步骤进行：

- 1) 分别向外压、内压和反压控制器充水排出空气，充入无气水；当外压、内压和反压控制器管道匀速排水、无气泡出现时停止排水，连接外压、内压和反压控制器与压力室。
- 2) 试样移入空心圆柱扭剪仪压力室（图 6.13.4），通过螺栓将试样基座与压力室内底座连接固定。
- 3) 利用轴力控制，使试样顶盖与上部传感器缓缓接近直至刚好接触，利用螺栓将其固定。

- 4) 对试样施加适当拉力，力的大小应与试样顶盖重力相等，然后将轴力、轴向位移、扭矩、旋转位移转角、孔隙水压力初始读数设置为零。
- 5) 连接压力室内部管线，宜按照由上至下的顺序连接。
- 6) 放下压力室外罩并固定，向压力室内注水，待注满水后同时关闭压力室排水口、压力室进水口，停止注水。
- 7) 控制器读数调零。

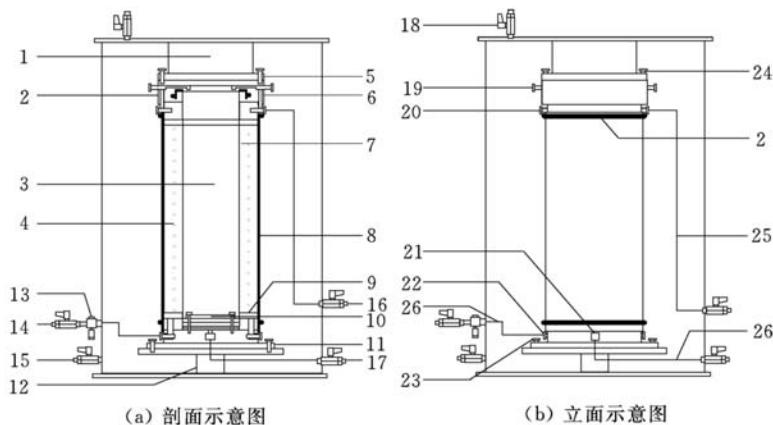


图 6.13.4 空心圆柱扭剪仪压力室示意图

- 1—轴力传感器；2—橡皮圈；3—内压室；4—试样；5—帽盖；6—顶盖；7—内
膜；8—外膜；9—透水板；10—内膜固定器；11—基座；12—压力室底座；
13—孔隙水压力控制阀；14—反压连通阀；15—围压连通阀；16—孔隙水
压力传感器；17—内压控制阀；18—外压力室排水阀；19—内压上排水口；
20—反压上排水口；21—内压下排水口；22—反压下排水口；23—基座—
压力室底座连接螺丝；24—帽盖—轴力传感器连接螺丝；
25—排水管路；26—内压控制管路

6.13.5 扰动粉土和砂土空心圆柱试样在压力室外的安装宜按本规程第 4.2.10 条执行；扰动粉土和砂土空心圆柱试样在压力室

内试样的安装，先拆除外壁模具，然后按本规程第 6.13.4 条第 2 款执行。

6.13.6 在最大与最小主应力差值不变的主应力轴循环旋转应力路径下，各参数的设置宜符合下列规定：

1 最大与最小主应力差的半值宜按下式计算：

$$\sigma_q = \eta \sigma'_c \quad (6.13.6-1)$$

式中： σ_q ——最大与最小主应力差的半值（kPa）

η ——初始应力比；

σ'_c ——初始有效平均主应力（kPa）。

2 施加的轴力与扭矩值宜按下式计算：

$$W = [\pi(p_o - p_i)r_i r_o + 2\pi(r_o^2 - r_i^2)\sigma_q \cos 2\pi f t] \times 10^{-6} \quad (6.13.6-2)$$

$$M_T = \left[\frac{2\pi(r_o^3 - r_i^3)\sigma_q}{3} \sin 2\pi f t \right] \times 10^{-6} \quad (6.13.6-3)$$

式中： W ——轴力（kN）；

p_i ——内压（kPa）；

p_o ——外压（kPa）；

r_i ——试样内半径（mm）；

r_o ——试样外半径（mm）；

f ——加载频率（Hz）；

t ——时间（s）；

M_T ——扭矩（kN·mm）。

6.13.7 空心圆柱动扭剪试验步骤宜符合下列要求：

1 试样安装结束后，排出试样内腔、压力室内部管线、接口等处的残留气体。分别用内压、反压控制器加压排气，当气体排净且排水速度恒定后，关闭排水阀并同时停止内压、反压控制器加压。

2 试样饱和后，维持反压不变，宜按下列步骤施加固结压力：

- 1) 设定轴力控制。
- 2) 设定外压和内压值。
- 3) 设定反压，当后续加载为不排水条件时，设定反压体积值恒定；当后续加载为排水条件时，设定反压值恒定。
- 3 固结完成后，进入动态控制系统，设定轴力波形、扭矩波形。
- 4 在最大与最小主应力差值不变的主应力轴循环旋转应力路径下，动力加载宜按下列步骤进行：
 - 1) 设定外压、反压和内压，其大小为固结阶段的设定值。
 - 2) 设置轴力加载，输入轴力大小峰值的平均值、轴力幅值和加载频率，相关输入值的计算按公式(6.13.6-2)执行。
 - 3) 设置扭矩加载，输入扭矩大小峰值的中心值、扭矩幅值和加载频率，相关输入值的计算按公式(6.13.6-3)执行。
- 5 试验加载周期及数据采集参数设置宜按下列步骤进行：
 - 1) 设置一次试验的单个或多个阶段的循环周期；
 - 2) 设置一个周期内采集的数据点数。
- 6 进行加载。
- 7 试验完成后，停止加载，打开排水口，依次设置轴力、扭矩、反压值为零，再同时设置外压与内压值为零，然后关闭外压、内压、反压的接口，打开压力室排水阀，将压力室内水排净。
- 8 拆除管路时先将试样内压接口卸下，并立即换上螺帽止水，再将其他接口卸下；拆除压力室顶盖螺栓，通过软件控制试样顶盖与压力室顶盖分离；拆除试样基座与压力室相连的固定螺栓，托住基座将试样拆除；清洗各装置。

6.13.8 动强度试验应符合下列规定：

1 试样达到破坏标准后，可再振动 5 周～10 周停止试验，取达到破坏标准时的振动次数为破坏振次。试样的破坏标准可取最大与最小主应变值之差达到 5%；对于可液化土的抗液化强度试验，可以初始液化作为破坏标准。

2 在同一破坏标准下，试样经过相同压力固结后，宜选择 4 个以上的初始应力比进行试验。

6.13.9 动强度试验成果整理应符合下列规定：

1 破坏时的动剪应力比应按下式计算：

$$R_f = \frac{q_f}{2\sigma'_c} \quad (6.13.9-1)$$

式中： R_f ——试样破坏时的动剪应力比；

σ'_c ——试样初始平均固结应力（kPa）；

q_f ——试样破坏时的广义剪应力（kPa）。

2 破坏时的动孔隙水压力比应按下式计算：

$$u_f = \frac{p_u}{p_0} \quad (6.13.9-2)$$

式中： u_f ——试样破坏时的动孔隙水压力比；

p_u ——破坏振次所在循环的孔隙水压力均值（kPa）。

3 破坏时的广义剪应力可按本规程附录 D 计算。

6.13.10 动强度的试验曲线可按下列方法绘制：

1 对同一固结条件下进行的不同初始应力比的试验，以破坏振次 N_f 的对数值为横坐标，破坏时的动剪应力比 R_f 为纵坐标，在半对数坐标上绘制破坏时的动剪应力比 R_f 与破坏振次 N_f 的关系曲线。

2 对于工程要求的等效破坏振次 N ，可根据破坏时的动剪应力比 R_f 与破坏振次 N_f 的关系曲线，确定相应 N 对应的破坏时的动剪应力比 R_{IN} 。

3 以破坏振次 N_f 的对数值为横坐标，破坏时的动孔隙水

压力比 u_f 为纵坐标, 在半对数坐标上绘制破坏时的动孔隙水压力比 u_f 与破坏振次 N_f 的关系曲线。

6.13.11 空心圆柱动扭剪试验的动模量可按下列规定计算:

1 动弹性模量可按下列式计算:

$$E_N = \frac{\sigma_{zN(\max)} - \sigma_{zN,0}}{\epsilon_{zN(\max)} - \epsilon_{zN,0}} \times 0.1 \quad (6.13.11-1)$$

式中: E_N ——第 N 次振动的动弹性模量 (MPa);

$\sigma_{zN(\max)}$ ——第 N 次振动的最大轴向应力 (kPa);

$\sigma_{zN,0}$ ——第 N 次振动的最小轴向应力 (kPa);

$\epsilon_{zN(\max)}$ ——第 N 次振动的最大轴向应变 (%);

$\epsilon_{zN,0}$ ——第 N 次振动的最小轴向应变 (%).

2 动剪切模量可按下列式计算:

$$G_N = \frac{\tau_{z\theta N(\max)} - \tau_{z\theta N,0}}{\gamma_{z\theta N(\max)} - \gamma_{z\theta N,0}} \times 0.1 \quad (6.13.11-2)$$

式中: G_N ——第 N 次振动的动剪切模量 (MPa);

$\tau_{z\theta N(\max)}$ ——第 N 次振动的最大扭剪应力 (kPa);

$\tau_{z\theta N,0}$ ——第 N 次振动的最小扭剪应力 (kPa);

$\gamma_{z\theta N(\max)}$ ——第 N 次振动的最大扭剪应变 (%);

$\gamma_{z\theta N,0}$ ——第 N 次振动的最小扭剪应变 (%).

3 空心圆柱动扭剪试验的参数可按本规程附录 D 计算。

6.13.12 动模量的试验曲线可按下列方法绘制:

1 以轴向动应变 $\epsilon_{zN(\max)}$ 为横坐标, 动弹性模量倒数 $1/E_N$ 为纵坐标, 绘制动弹性模量倒数 $1/E_N$ 与轴向动应变 $\epsilon_{zN(\max)}$ 的关系曲线, 可将曲线切线在纵轴上截距的倒数值取为最大动弹性模量。

2 以轴向动应变 $\epsilon_{zN(\max)}$ 为横坐标, 动弹性模量 E_N 为纵坐标, 绘制动弹性模量 E_N 与轴向动应变 $\epsilon_{zN(\max)}$ 的关系曲线, 分析动弹性模量随轴向动应变的变化趋势, 可取变化曲线的稳定峰值为最大动弹性模量。

3 以扭剪动应变 $\gamma_{z\theta N(\max)}$ 为横坐标, 动剪切模量倒数 $1/G_N$ 为纵坐标, 绘制动剪切模量倒数 $1/G_N$ 与扭剪动应变 $\gamma_{z\theta N(\max)}$ 的关系曲线, 可将曲线切线在纵轴上截距的倒数值取为最大动剪切模量。

4 以扭剪动应变 $\gamma_{z\theta N(\max)}$ 为横坐标, 动剪切模量 G_N 为纵坐标, 绘制动剪切模量 G_N 与扭剪动应变 $\gamma_{z\theta N(\max)}$ 的关系曲线, 分析动剪切模量随扭剪动应变的变化趋势, 可取变化曲线的稳定峰值为最大动剪切模量。

6.13.13 空心圆柱动扭剪试验原始数据记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.17-1 的格式, 空心圆柱动扭剪试验应力、应变计算表可采用本规程附录 C 中表 C.0.17-2 的格式。

6.14 微型十字板剪切试验

6.14.1 微型十字板剪切试验可用于测定饱和软黏土的不排水抗剪强度。

6.14.2 微型十字板剪切试验设备宜主要包括扭力计、扭力装置和板头, 板头刀片宽度宜为 12.7mm~25.4mm, 板头的高宽比宜为 2:1, 板头刀片与轴杆的截面积之和与扭转剪切圆柱体截面积的比值应小于 15%。

6.14.3 微型十字板剪切试验应符合下列规定:

1 在进行试验之前应对扭力计进行标定, 扭力弹簧式应标定弹簧转角与力矩的关系; 电测式应标定电压与力的关系。

2 选取表面平整且大小合适的土样, 试验时板头外缘距离土样外缘不应小于板头直径的 2 倍。

3 预估土样的不排水抗剪强度, 选装合适的板头, 土样保持在样筒中, 将板头压入土样至不低于板头高度 2 倍的深度。

4 扭矩测量采用扭转弹簧时, 扭转剪切速率宜为 $60^\circ/\text{min} \sim 90^\circ/\text{min}$; 扭矩测量采用刚性扭矩传感器时, 扭转剪切速率宜为 $20^\circ/\text{min} \sim 30^\circ/\text{min}$ 。

5 每转动 5°记录一次扭力，直至扭力达到峰值或者转动角度到达 180°。土体剪切破坏后，缓慢释放扭力。

6 指针复位前，读取峰值不排水抗剪强度。

7 微型十字板试验的平行试验不应少于 3 次，剔除偏差较大的读数，取其平均值。

6.14.4 微型十字板剪切试验成果整理应符合下列规定：

1 土样的不排水抗剪强度应按下式计算：

$$c_u = T \cdot K \quad (6.14.4-1)$$

式中： c_u ——不排水抗剪强度（Pa）；

T ——测量得到的峰值扭矩（N·m）；

K ——十字板头常数（ m^{-3} ）。

2 十字板头常数应按下式计算：

$$K = \frac{2 \times 10^9}{\pi D^2 H \left(1 + \frac{D}{3H} \right)} \quad (6.14.4-2)$$

式中： D ——十字板头的直径（mm）；

H ——十字板头的高度（mm）。

3 宜绘制不排水抗剪强度随深度的变化曲线。

6.14.5 微型十字板剪切试验记录表可采用本规程附录 C 中表 C.0.18 的格式。

6.15 袖珍贯入仪试验

6.15.1 袖珍贯入仪可用于室内测定黏性土的液性指数，估算土的承载力基本值。

6.15.2 袖珍贯入仪（图 6.15.2）应主要包括刻度仪、定位螺母、锁紧螺母、支撑杆和探头。可根据土质的软硬程度选择测头，测头类型及测力范围见表 6.15.2。

6.15.3 袖珍贯入仪试验应符合下列规定：

1 试验前应标定，获得标定系数。

2 室内试验时,选取有代表性的试样,应辨别土样的上下和层次,整平土样两端,放置在平台上测定。钻孔取土时,宜在样筒中测试,在取土器底端管靴旋下后削平土面进行测定。也可在待测地基表面去掉硬壳层后进行测定。

3 贯入点与试样边缘的距离,平行试验时同一试样上贯入点之间的距离以及试样厚度均不宜小于三倍测头直径。

4 贯入时测杆与土样表面应垂直,测头应匀速贯入土内至测头上刻划线与土面接触为止,贯入时间宜为 10s。

5 测头宜从土中缓慢提出,读取贯入阻力。

6 每做完一个测点,宜将仪器调零。

7 贯入的平行试验不应少于 3 次,剔除偏差较大的读数,取其平均值。

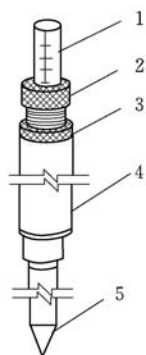


图 6.15.2 袖珍贯入仪

1—刻度仪; 2—定位螺母; 3—销紧螺母; 4—支撑杆; 5—测头

表 6.15.2 测头类型及测力范围

测头类型	直径 D (mm)	长度 L (mm)	形状	适用土类	测力范围 (N)
A	6.20	6	平头	较硬土	0~60
B	13.80	6	平头	较软土	20~40
C	5.36	10	锥头、锥度 30°	较硬土	0~60

6.15.4 土的贯入阻力可按下列计算公式计算:

$$P_{ta} = K_{ta} R \quad (6.15.4-1)$$

$$P_{tb} = K_{tb} R \quad (6.15.4-2)$$

$$P_{tc} = K_{tc} R \quad (6.15.4-3)$$

式中: P_{ta} 、 P_{tb} 、 P_{tc} ——A、B、C 测头的贯入阻力 (100kPa);

K_{ta} 、 K_{tb} 、 K_{tc} ——A、B、C 测头的贯入仪率定系数；

R ——贯入读数。

6.15.5 可根据土的贯入阻力及相应土类，根据工程经验估计土的液性指数和地基承载力基本值。

7 原位测试

7.1 静力触探试验

I 一般规定

7.1.1 静力触探试验可用于黏性土、粉土和砂土。

7.1.2 静力触探试验可测定比贯入阻力、锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力。

7.1.3 静力触探在海上的作业方式可分为海床式、海床吸力式、井下式、固定平台式和船载式。

7.1.4 静力触探探头可采用单桥探头、双桥探头、带孔隙水压力或测斜的多功能探头。采用静力触探划分海洋地层结构、判断地层状态和估算地层物理力学参数时，宜采用能测试孔隙水压力、锥尖阻力和侧壁摩阻力的探头。

7.1.5 探头的测力传感器应连同仪器、电缆进行定期标定，标定周期不应超过1年。室内标定探头测力传感器的非线性误差、重复性误差、滞后误差、温度漂移、归零误差均应小于最大量程的1%，现场试验归零误差应小于最大量程的3%，零位温漂值不应大于最大量程的0.05%/℃，绝缘电阻不应小于500MΩ。常用静力触探探头规格可按表7.1.5选取。

表 7.1.5 常用静力触探探头规格

探头类型	单桥		双桥/多功能	
锥角 (°)	60		60	
锥底截面积 (cm ²)	10.0	15.0	10.0	15.0
锥底直径 (mm)	35.7	43.7	35.7	43.7
侧壁长度 (mm)	57.0	70.0	—	—

续表 7.1.5

探头类型	单桥		双桥/多功能	
侧壁面积 (cm ²)	64.0	96.0	—	—
摩擦筒侧壁长度 (mm)	—	—	178.3	218.5
摩擦筒侧壁面积 (cm ²)	—	—	200.0	300.0

7.1.6 静力触探试验应符合下列规定：

1 探头应匀速垂直压入地层中，贯入速率应为 20mm/s，贯入速率偏差值不应大于 5mm/s。

2 当贯入深度超过 30m 或穿过厚层软土后再贯入硬土层时，应采取措施防止孔斜或断杆，也可配置测斜探头，量测触探孔的偏斜角，校正土层界线深度。

3 孔隙水压力静力触探探头在贯入前应进行抽气饱和处理，并在现场采取措施保持探头的饱和状态，测试过程中不应上提探头。

4 在预定深度进行超孔隙水压力消散试验时，应量测停止贯入后不同时间的孔隙水压力值，其计时间隔由密而疏合理控制，且试验过程不应松动探杆。持续时间宜使超孔隙水压力消散到 50% 以下或完全消散。

5 达到预设进尺深度或测试系统设备的安全加荷限制时结束试验。

7.1.7 静力触探试验记录应符合下列规定：

1 静力触探测试过程中数据的采集间距不宜大于 5cm。

2 井下式静力触探测试，在每回次测试开始前和结束后均应记录探头位于孔底静止状态时的零漂值，比较测试前后两次零漂值，分析探头及测试数据的可靠性，两者相差较大时应分析原因并对本回次的测试数据进行校正。

3 海床式、海床吸力式、平台式、船载式静力触探测试，测试开始前和结束后均应记录探头位于同一高度处静止状态时的

零漂值，比较测试前后两次零漂值，分析探头及测试数据的可靠性，两者相差较大时应分析原因并对测试数据进行校正。

4 孔隙水压力静力触探测试，应记录孔隙水压力传感器的位置。

7.1.8 静力触探试验成果整理应符合下列规定：

1 修正锥尖阻力可按式计算：

$$q_t = q_c + u_z(1-a) \quad (7.1.8-1)$$

$$a = A_a/A_c \quad (7.1.8-2)$$

式中： q_c ——测得的锥尖阻力（kPa）；

q_t ——修正后的锥尖阻力（kPa）；

u_z ——锥肩的孔隙水压力（kPa）；

a ——有效面积比，大部分探头为 0.55~0.90；

A_a ——顶柱的横截面积（cm²）；

A_c ——锥底的横截面积（cm²）。

2 摩阻比可按式计算：

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \times 100 \quad (7.1.8-3)$$

式中： R_f ——摩阻比（%）；

f_s ——侧壁摩阻力（kPa）。

3 孔压参数比应按式计算：

$$B_q = \frac{u_z - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (7.1.8-4)$$

式中： B_q ——孔压参数比；

σ_{v0} ——土的竖向总应力（kPa）；

u_0 ——静孔隙水压力（kPa）；

Δu ——超孔隙水压力（kPa）。

4 宜按探头的类型绘制下列曲线：

- 1) 单桥探头宜绘制比贯入阻力 P_s 与深度 z 的关系曲线。

- 2) 双桥探头宜绘制锥尖阻力 q_c 、侧壁摩阻力 f_s 、摩阻比 R_f 与深度 z 的关系曲线。
- 3) 带孔隙水压力量测的多功能探头宜绘制孔隙水压力 u_i 、修正锥尖阻力 q_t 、侧壁摩阻力 f_s 、孔压系数 B_q 与深度 z 的关系曲线。
- 4) 测试孔隙水压力消散过程时，宜以孔隙水压力为纵坐标，以时间的对数值为横坐标，绘制关系曲线。
- 5) 测斜时宜绘制探头倾角 α 与深度 z 的关系曲线。

5 可按贯入曲线的线型特征，结合场地的钻探资料和地区经验判定土性和划分土层，并宜统计各孔每一土层的比贯入阻力、锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力等测试值，可统计场地各土层测试值的平均值。

6 结合其他勘察资料和地区经验，静力触探成果可用于分析土体的重度，黏性土的塑性状态、无黏性土的密实状态，估算黏性土的固结系数、渗透系数、不排水抗剪强度，无黏性土的相对密度、内摩擦角，估算地基承载力特征值、单桩承载力，判断沉桩可能性，进行液化评价等。可采用下列方法计算：

- 1) 土的天然重度可按下式计算：

$$\gamma/\gamma_w = 0.271\lg\left(\frac{f_s}{q_t} \times 100\right) + 0.361\lg\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \quad (7.1.8-5)$$

式中： p_a ——大气压力 (kPa)；

γ ——土的天然重度 (kN/m^3)；

γ_w ——水的重度 (kN/m^3)。

- 2) 黏性土的不排水抗剪强度可按下式计算：

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (7.1.8-6)$$

式中： N_{kt} ——经验系数，可通过标定试验得到。

- 3) 砂土的相对密度可按下式计算：

$$D_r = \frac{1}{C_2} \ln \frac{q_c/p_a}{C_0(\sigma'/p_a)^{C_1}} \quad (7.1.8-7)$$

式中： C_0 、 C_1 、 C_2 ——经验系数，可根据标定试验得到。

σ' ——有效应力（kPa），可采用土的平均有效应力或竖向有效应力。

- 4) 砂土的有效内摩擦角可通过相对密度与有效内摩擦角之间的关系（图 7.1.8）查得。

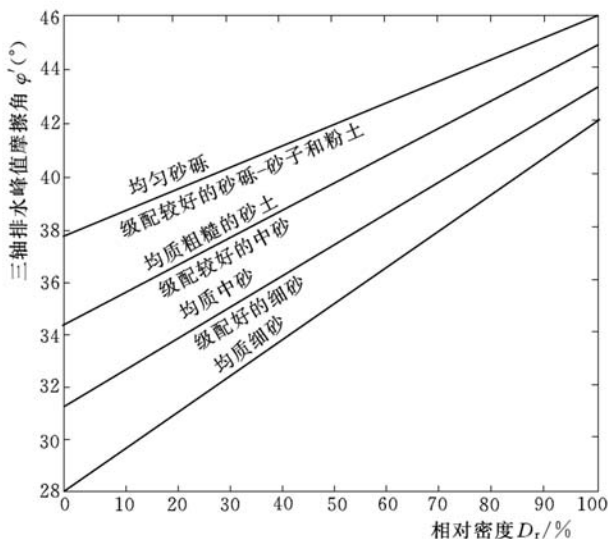


图 7.1.8 相对密度与有效内摩擦角之间的关系

II 海床式静力触探试验

7.1.9 海床式静力触探试验设备应主要包括海底推力系统、脐带电缆、数据采集和控制系统、探头、探头测试单元、探头真空饱和单元。

7.1.10 海床式静力触探试验应符合下列要求：

- 1 选用合适的探头，对探头测试单元、探头真空饱和单元进行预检调试。

2 组装探头、探杆、脐带电缆于海床式静力触探设备上，调节夹紧缸施加压力闭合驱动轮，夹持住探杆。

3 在海床式静力触探设备沉水过程中，将探杆逐节连接，同时通过电缆导轮释放脐带电缆。

4 将海床式静力触探设备沉到海底，保持静力触探设备在海底处于水平状态。

5 启动海底推力系统，监控数据采集和控制系统，根据进尺添加探杆，同时监控脐带电缆下降，根据土层状况通过数据采集和控制系统控制海底推力系统。

Ⅲ 海床吸力式静力触探试验

7.1.11 海床吸力式静力触探试验系统（图 7.1.11）宜主要包括下列设备：

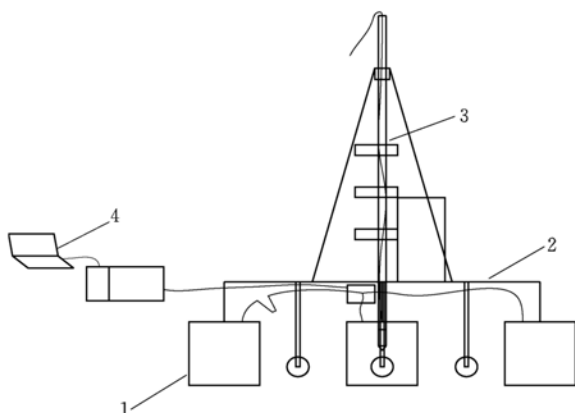


图 7.1.11 海床吸力式静力触探试验系统

1—吸力桶反力子系统；2—反力支撑子系统；3—静力触探子系统；

4—自动控制及数据采集子系统

1 吸力桶、垂直高度调节液压油缸、真空泵组成的吸力桶反力子系统。

2 连接支架和工作平台组成的反力支撑子系统。

3 探头、探杆、探杆锁紧及贯入液压装置和探杆辅助定位支架组成的静力触探子系统。

4 水平调节控制、探杆自动下压控制、触探试验数据采集组成的自动控制及数据采集子系统。

5 移动吊装附属设备。

7.1.12 海床吸力式静力触探试验应符合下列要求：

1 在船上组装系统后，预接一定长度的探杆，整机吊装入水，吸力桶下沉压入海床。

2 采用真空泵将吸力桶内的水和空气抽出，形成并保持负压达 0.8 个大气压以上，直至吸力桶下沉就位。

3 通过液压油缸调平反力支撑平台，下沉过程中添加探杆，并通过电缆导轮释放电缆。

4 保持静力触探设备在海底处于水平状态，将探头匀速垂直压入土层中。

IV 井下式静力触探试验

7.1.13 井下式静力触探试验可在具有动态定位的勘探船或固定式平台进行，其设备宜主要包括钻探设备、液压装置、电缆、探头、探头真空饱和单元和数据采集系统。

7.1.14 井下式静力触探试验应符合下列规定：

1 将井下式静力触探仪安装在勘探平台上，并保证平台能提供足够的反力，确保探杆贯入与拔起时的垂直度以及机座的稳定。

2 在试验开始前或使用新的触探头前，检查探头和数据采集系统。

3 试验前下入钻探护孔设备，护孔设备进入海底泥面以下不宜少于 3m，保持护孔设备竖直。

4 下入静力触探探头和探杆，将探头匀速竖直压入土层中达到最大贯入深度，每次最大贯入深度宜为 3m，完成一个贯入冲程。

5 可采用静力触探和钻探取样交替进行。当静力触探不能达到一个完整冲程的深度，可采用钻探取样完成，再进行下一冲程的静力触探。

6 遇连续两次贯入深度小于 0.5m 时，可用钻探设备钻进 1m 深度，然后继续静力触探。

V 固定平台式静力触探试验

7.1.15 固定平台式静力触探试验设备应符合下列规定：

1 试验设备应主要包括静力触探仪、承载平台和保护探杆的套管。

2 承载平台可采用海上自升式平台或支架式平台，其抗风浪能力应满足作业与安全的要求。

3 宜采用双重套管，外套管直径宜大于 146mm，应满足抗水流、风浪和套管变径的要求。内套管直径不宜大于 63.5mm，应保证探杆自由上下。套管上端固定在作业平台上，套管下端的入土深度应保证作业顺利进行。

7.1.16 固定平台式静力触探试验应符合下列规定：

1 静力触探仪应水平安装在平台上，并确保探杆贯入与拔起时的垂直度以及机座的稳定。

2 依次下入外套管、内套管，外套管底端进入海底不宜少于 3m，内套管底端进入海底不宜少于 1m。

3 下入静力触探探头和探杆，将探头匀速垂直压入土层中达到预定深度。

VI 船载式静力触探试验

7.1.17 船载式静力触探试验设备应符合下列要求：

1 船载式静力触探设备应主要包括静力触探仪、船上作业平台和保护探杆的套管。

2 静力触探仪和套管要求应符合本规程第 7.1.15 条的规定。

7.1.18 船载式静力触探试验应符合下列规定：

1 将静力触探设备安装在作业平台上，确保探杆贯入与拔起时的垂直度以及机座的稳定。

2 在风力小于 6 级且船体稳定时，依次下入外套管、内套管，外套管底端进入泥面不宜小于 3m，内套管顶端固定于平台上，底端宜位于泥面以上 2m~3m。

3 下入静力触探探头和探杆，将探头匀速竖直压入土层中达到预定深度。

7.2 T 形触探试验

7.2.1 T 形触探试验可用于软黏土。T 形触探仪的单次贯入-上拔试验可用于测定原状土的不排水抗剪强度；T 形触探仪的反复贯入-上拔试验可用于测定扰动土的不排水抗剪强度。

7.2.2 标准 T 形触探仪（图 7.2.2）的探头宜为直径 40mm，长度 250mm 的金属圆柱体；探杆直径不应大于探头直径；可采用直径 36mm 的静力触探探杆；探头的粗糙度宜为 $0.4\mu\text{m} \pm 0.25\mu\text{m}$ 。

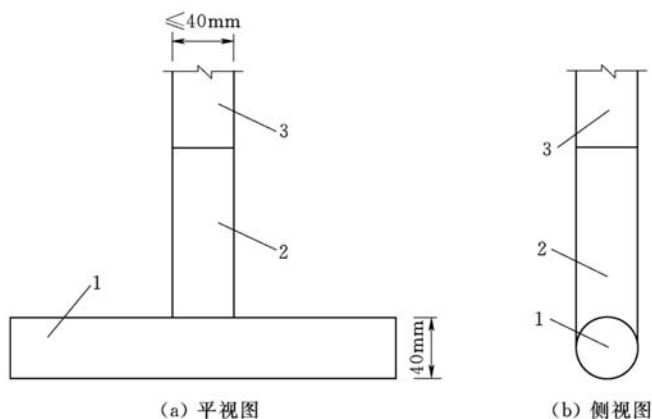


图 7.2.2 T 形触探仪

1—T 形探头；2—荷重传感器；3—探杆

7.2.3 小型 T 形触探仪的探头长度-直径比宜为 4~10；探杆横截面积不应大于探头在垂直于探杆的平面上投影面积的 15%，且探杆直径不应大于探头直径；探头的粗糙度宜为 $0.4\mu\text{m}\pm 0.25\mu\text{m}$ 。

7.2.4 T 形触探仪的校准应符合下列规定：

- 1 每三个月或使用 100 次后，荷重传感器均应进行校准。
- 2 当荷重传感器加载至最大容许值时，下一次使用前应进行校准。
- 3 应考虑温度对测量精度的影响，在 $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内，可按照 5°C 的温差对探头进行校准。

7.2.5 T 形触探试验应符合下列规定：

- 1 在贯入和上拔过程中，应测量 T 形探头的阻力。
- 2 标准 T 形触探仪贯入和上拔速率可取 $20\text{mm/s}\pm 5\text{mm/s}$ ；小型 T 形触探仪贯入和上拔速率可按探头直径 D 计算，可取 $0.5D/\text{s}\pm 0.125D/\text{s}$ 。整个贯入和上拔过程，应记录所采用的速率。
- 3 数据采集频率不宜低于每秒一次。
- 4 当现场测试深度超过 5m 时，应测量 T 形触探仪探杆的倾斜角，倾斜角不宜超过 2° 。
- 5 T 形触探仪的反复贯入-上拔试验的单次行程不应小于 200mm 或 $5d$ 。宜反复进行 10 次~20 次行程，对高灵敏度黏性土取高值，对低灵敏度黏性土取低值。
- 6 数据测量精度应在测量值的 $\pm 2\%$ 内，且应在 $\pm 1\text{kPa}$ 以内。

7.2.6 T 形触探试验成果整理与分析应采用下列方法：

- 1 探头阻力可按下式计算：

$$q_{\text{T-bar}} = q_m - \left[\sigma_{v0} - u_0 \left(1 - \frac{A_n}{A_s} \right) \right] \left(\frac{A_s}{A_p} \right) \quad (7.2.6-1)$$

式中： $q_{\text{T-bar}}$ ——净贯入阻力（kPa）；

q_m ——测得的贯入阻力（kPa）；

u_0 ——探头测点的静水压力 (kPa);

σ_{v0} ——原位竖向总应力 (kPa);

A_p ——探头在垂直于探杆的平面上的投影面积 (cm^2);

A_n ——荷重传感器上静水压力作用的有效面积 (cm^2);

A_s ——探杆的横截面积 (cm^2)。

2 软黏土的不排水抗剪强度可按下式计算:

$$c_u = q_{T\text{-bar}} / N_{T\text{-bar}} \quad (7.2.6-2)$$

式中: c_u ——不排水抗剪强度 (kPa);

$N_{T\text{-bar}}$ ——阻力系数, 宜通过室内试验或现场测试进行标定。

探头表面粗糙度为 $0.4\mu\text{m} \pm 0.25\mu\text{m}$ 时, 可取

$$N_{T\text{-bar}} = 10.5。$$

3 软黏土的灵敏度可按下式计算:

$$S_t = c_u / c'_u \quad (7.2.6-3)$$

式中: c_u ——原状土的不排水抗剪强度 (kPa), 采用反复贯入-上拔的首次数据, 按公式 (7.2.6-2) 计算;

c'_u ——重塑土的不排水抗剪强度 (kPa), 采用反复贯入-上拔的末次数据, 按公式 (7.2.6-2) 计算。

4 绘制试验成果图。

5 测量压力应以海底泥面处的静水压力作为零压力。

7.2.7 T形触探试验记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.19 的格式。

7.3 球形触探试验

7.3.1 球形触探试验可用于软黏土。球形触探仪的单次贯入-上拔试验可用于测定原状土的不排水抗剪强度; 球形触探仪的反复贯入-上拔试验可用于测定扰动土的不排水抗剪强度。

7.3.2 标准球形触探仪 (图 7.3.2) 的探头宜为直径 113mm 的金属球体; 可采用横截面积 10cm^2 、直径 36mm 的静力触探探杆; 探头的粗糙度宜为 $0.4\mu\text{m} \pm 0.25\mu\text{m}$ 。

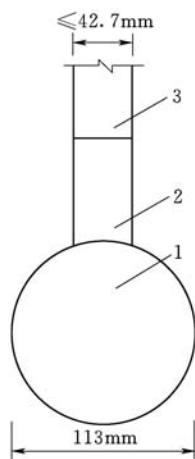


图 7.3.2 球形触探仪
1—球形探头；2—荷重传感器；3—探杆

7.3.3 小型球形触探仪的探杆横截面积不应大于探头在垂直于探杆的平面上投影面积的 15%，且在距探头连接处 10 倍探杆直径的范围内探杆直径不增大；探头的粗糙度宜为 $0.4\mu\text{m} \pm 0.25\mu\text{m}$ 。

7.3.4 球形触探仪的校准应符合下列规定：

1 每三个月或使用 100 次后，荷重传感器均应进行校准。

2 当荷重传感器加载至最大容许值时，下一次使用前应进行校准。

3 应考虑温度对测量精度的影响，在 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 范围内，可按照 5°C 的温差对探头进行校准。

7.3.5 球形触探仪贯入试验应符合下列规定：

规定：

1 在贯入和上拔过程中，应测量球形探头的阻力。

2 标准球形触探仪贯入和上拔速率可取 $20\text{mm/s} \pm 5\text{mm/s}$ ；小型球形触探仪贯入和上拔速率可按探头直径 D 计算，可取 $0.25D/\text{s}$ 。整个贯入和上拔过程，应记录所采用的速率。

3 数据采集频率不宜低于每秒一次。

4 当现场测试深度超过 5m 时，应测量球形触探仪探杆的倾斜角，倾斜角不宜超过 2° 。

5 球形触探仪的反复贯入-上拔试验的单次行程不应小于 300mm 或 $3D$ 。宜反复进行 10 次~20 次行程，对高灵敏度黏性土取高值，对低灵敏度黏性土取低值。

6 数据测量精度应在测量值的 $\pm 2\%$ 内，且应在 $\pm 1\text{kPa}$ 以内。

7.3.6 球形触探仪贯入试验成果整理应采用下列方法：

1 探头阻力可按下式计算：

$$q_{\text{ball}} = q_{\text{m}} - \left[\sigma_{\text{v}0} - u_0 \left(1 - \frac{A_{\text{n}}}{A_{\text{s}}} \right) \right] \frac{A_{\text{s}}}{A_{\text{p}}} \quad (7.3.6-1)$$

式中： q_{ball} ——净贯入阻力（kPa）；

q_{m} ——测得的贯入阻力（kPa）；

u_0 ——探头测点的静水压力（kPa）；

$\sigma_{\text{v}0}$ ——原位竖向总应力（kPa）；

A_{p} ——探头在垂直于探杆的平面上的投影面积（ cm^2 ）；

A_{n} ——荷重传感器上静水压力作用的有效面积（ cm^2 ）；

A_{s} ——探杆的横截面积（ cm^2 ）。

2 软黏土的不排水抗剪强度可按下式计算：

$$c_{\text{u}} = q_{\text{ball}} / N_{\text{ball}} \quad (7.3.6-2)$$

式中： c_{u} ——不排水抗剪强度（kPa）；

N_{ball} ——阻力系数，宜通过室内试验或现场测试进行标定。探头表面粗糙度为 $0.4\mu\text{m} \pm 0.25\mu\text{m}$ 时，可取 $N_{\text{ball}} = 11.0$ 。

3 软黏土的灵敏度可按下式计算：

$$S_{\text{t}} = c_{\text{u}} / c'_{\text{u}} \quad (7.3.6-3)$$

式中： c_{u} ——原状土的不排水抗剪强度（kPa），采用反复贯入—上拔的首次数据，按公式（7.3.6-2）计算；

c'_{u} ——重塑土的不排水抗剪强度（kPa），采用反复贯入—上拔的末次数据，按公式（7.3.6-2）计算。

4 绘制试验成果图。

5 测量压力应以海底泥面处的静水压力作为零压力。

7.3.7 球形触探试验记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.19 的格式。

7.4 十字板剪切试验

7.4.1 十字板剪切试验可用于测定饱和软黏土的不排水抗剪强

度和灵敏度。

7.4.2 十字板剪切试验宜在稳定的海上平台上或采用海床式静探仪进行测试，海底至平台间探杆应采用套管保护。

7.4.3 软黏土中存在粉细砂夹层或透镜体时，宜先进行静力触探试验探清土层分布，选择软黏土层进行试验。

7.4.4 试验所用的仪器设备应符合下列规定：

1 十字板剪切试验仪器应主要包括压入主机、十字板头、扭力装置和测试仪。扭力装置主要包括探杆、变速齿轮、探杆夹具和手柄，固定在压入主机上。

2 压入主机可采用触探主机或其他压入设备，提供的反力应能将十字板头垂直压入到测试土层中，探杆直径不宜小于 36mm。

3 十字板头、扭力装置和测试仪的规格应符合现行国家标准《土工试验仪器 剪切仪 第 2 部分：现场十字板剪切仪》GB/T 4934.2 的相关规定。

7.4.5 十字板剪切试验应符合下列规定：

1 试验开始前，应将十字板头与扭力传感器拧紧，传感器电缆沿探杆相同方向逐节穿好，并摆放整齐。

2 调整机架使测试孔位于机架面板中心，将十字板头及扭力传感器穿过机架面板中心，并与探杆相连。再由压入主机逐节压入土层中，达到预定的试验深度处，拧紧扭力装置上的探杆夹具。当试验深度处在较硬的夹层时，应采用钻机引孔或者直接压入等方式穿过夹层再进行试验。

3 静止 2min~3min 后将量测仪表调零或读取初始读数，开始试验。

4 测定原状土的不排水抗剪强度时，顺时针方向匀速转动扭力装置手柄，探杆转动速率宜为 $(1^{\circ}\sim 2^{\circ})/10s$ ，同时测试仪表自动记录，当扭力读数出现峰值或稳定值后，再继续旋转测记 1min。测定重塑土不排水抗剪强度时，应先将探杆按顺时针方

向旋转 6 圈，使十字板头周围土充分扰动，再进行试验。

5 松开探杆夹具，将十字板头压至下一个试验深度。

6 当需要穿越砂层时，应在钻孔内下套管至测试深度以上 3 倍~5 倍套管直径或 0.5m 处。

7.4.6 十字板剪切试验成果整理与分析应符合下列规定：

1 原状土和重塑土的不排水抗剪强度 c_u 、 c'_u 应按下列公式计算：

$$c_u = 10K'_1 \xi R_y \quad (7.4.6-1)$$

$$c'_u = 10K'_1 \xi R_e \quad (7.4.6-2)$$

$$K'_1 = \frac{2}{\pi D^2 H \left(1 + \frac{D}{3H}\right)} \quad (7.4.6-3)$$

式中： c_u ——原状土不排水抗剪强度 (kPa)；

c'_u ——重塑土不排水抗剪强度 (kPa)；

D ——十字板头直径 (cm)；

H ——十字板头高度 (cm)；

ξ ——传感器率定系数 ($\text{N} \cdot \text{cm}/\mu\epsilon$)；

R_y ——原状土剪切破坏时的读数 ($\mu\epsilon$)；

R_e ——重塑土剪切破坏时的读数 ($\mu\epsilon$)；

K'_1 ——与十字板头尺寸有关的常数 (cm^{-3})。

2 土的灵敏度 S_t 应按下式计算：

$$S_t = c_u / c'_u \quad (7.4.6-4)$$

3 以剪应力为纵坐标，转动角为横坐标，绘制各试验点的剪应力与转动角的关系曲线，以此确定并绘制不排水抗剪强度随深度的变化曲线。

7.4.7 十字板剪切试验记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.20 的格式。

7.5 标准贯入试验

7.5.1 标准贯入试验可用于砂土、粉土、黏性土，并宜在固定

式平台上进行。

7.5.2 标准贯入试验设备规格应符合表 7.5.2 的规定。

表 7.5.2 标准贯入试验设备规格

落 锤		锤的质量（kg）	63.5
		落距（cm）	76
贯入器	对开管	长度（mm）	>500
		外径（mm）	51
		内径（mm）	35
	管靴	长度（mm）	50~76
		刃口角度（°）	18~20
		刃口单刃厚度（mm）	1.6
		探杆	
相对弯曲	<1/1000		

7.5.3 标准贯入试验应符合下列规定：

1 标准贯入试验孔宜采用回转钻进，并保持孔壁稳定，孔底的沉渣高度不应超过 5cm。滩涂钻孔应保持孔内水位略高于地下水水位。下放贯入器不应冲击孔底。

2 采用浮式平台时，贯入度量测基面应不受平台晃动的影响。

3 采用自动脱钩的自由落锤法进行锤击，贯入器、探杆、导向杆应紧密连接，并保持垂直度，锤击时不应偏心或侧向晃动，锤击速率应小于 30 击/min。

4 贯入器打入土中 15cm 后，开始记录每打入 10cm 的锤击数，累计打入 30cm 的锤击数为实测锤击数。当锤击数已达 50 击，而贯入深度未达 30cm 时，可记录 50 击的实际贯入深度并终止试验，实测锤击数 N 可按下式计算：

$$N = 30 \times 50 / \Delta S \quad (7.5.3)$$

式中： N ——实测锤击数；

ΔS ——50 击时的贯入度 (cm)。

7.5.4 标准贯入试验成果与分析应符合下列要求：

1 汇编标准贯入试验成果表，可按其测试深度标注于钻孔柱状图或工程地质剖面图上，也可绘制单孔实测击数与深度关系曲线或直方图。

2 试验土层中夹杂有卵石、碎石、砾石、姜石、硬贝壳或薄层胶结层、硬土层等使标准贯入试验击数异常时，应剔除异常值后再分层统计。

3 标准贯入试验成果可用于判别砂土、粉土物理状态，估算地基承载力特征值，判别砂土和粉土是否液化，评价沉桩、成桩的可能性等。

7.6 动力触探试验

7.6.1 动力触探试验可用于砂土、碎石土、极软岩、软岩等，并宜在固定式平台上试验。

7.6.2 海上宜采用重型或超重型动力触探，动力触探类型应符合表 7.6.2 的规定。

表 7.6.2 动力触探类型

类 型		重 型	超重型
落 锤	锤的质量 (kg)	63.5	120
	落距 (cm)	76	100
探 头	直径 (mm)	74	74
	锥角 (°)	60	60
探杆直径 (mm)		42	50~60
指 标		贯入 10cm 的读数 $N_{63.5}$	贯入 10cm 的读数 N_{120}
适用地层		砂土、中密及以下 碎石土、极软岩	密实和很密实的碎石土、 极软岩、软岩

7.6.3 动力触探试验应符合下列规定：

1 所有连接部件应连接紧密，并采用自动落锤装置。

2 探杆最大偏斜度不应超过 2%，锤击贯入应连续进行，应防止锤击偏心、探杆倾斜和侧向晃动，保持探杆垂直度；锤击速率每分钟宜为 15 击~30 击。试验时，发生导向杆与探杆晃动及锤击偏心的情况，应停止试验。

3 每贯入 1m，宜将探杆转动一圈半；连续贯入深度超过 10m，每贯入 20cm 宜转动探杆一圈半。碎石土连续贯入深度不宜超过 12m。

4 采用浮式平台时，贯入度量测基面不应受平台晃动的影响。

5 对重型动力触探，当连续三次 $N_{63.5}$ 大于 50 击时，可停止试验或改用超重型动力触探。

6 探头直径磨损不应大于 2mm，锥尖高度磨损不应大于 5mm。

7.6.4 动力触探试验成果分析应符合下列要求：

1 绘制锤击数与贯入深度关系曲线，并统计单孔分层贯入击数平均值。

2 根据各孔分层的贯入击数平均值，用厚度加权平均法计算场地分层贯入击数平均值和变异系数。

3 可根据动力触探试验成果，结合地区经验，评价岩土的不均匀性和物理状态、强度和变形参数、地基承载力特征值、单桩承载力，查明软硬土层界面等。

4 当根据重型动探或超重型动探判别碎石土的密实时，应按现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定进行修正。

7.7 旁压试验

7.7.1 旁压试验可用于黏性土、粉土、砂土、碎石土、残积土、极软岩和软岩等岩土层。海上风电场工程宜采用预钻式旁压试验。

7.7.2 旁压试验可测定岩土层的原位水平土压力、临塑压力、极限压力和旁压模量。

7.7.3 预钻式旁压试验仪应包括旁压器、加压稳定装置和变形测量装置及导管等部分，预钻式旁压仪规格应符合表 7.7.3 的规定。

表 7.7.3 预钻式旁压仪规格

旁压器				体变管		压力		量管截面积 (cm ²)
外径 (mm)	中腔 长度 (mm)	总长度 (mm)	中腔固 有体积 (cm ³)	量程 (cm ³)	最大允 许误差 (%)	量程 (MPa)	最大允 许误差 (%)	
44~90	200~480	450~980	491~790	0~800	±1.5	0~10.0	±1.5	13.2~34.5

7.7.4 预钻式旁压试验应符合下列规定：

1 应根据岩土的类型和状态选择适宜的钻头开孔。孔壁应垂直、呈完整的圆形，应采取措施降低对孔壁的扰动。

2 在松散砂层和软土地层中，可采用泥浆护壁或者套管跟进钻进，套管底部深度至少小于测点深度 1m。试验钻孔孔径宜大于旁压器外径 2mm~6mm。

3 成孔后应立即进行旁压试验。

4 试验点布置应保证旁压器上、中、下三腔在同一土层中，试验点竖向间距不宜小于 1m。试验孔与已有钻孔的水平距离不宜小于 1m，已进行钻孔取芯或标贯试验的部位不应进行旁压试验。

5 试验用水不应采用海水，可用蒸馏水或无杂质的冷开水。

6 将旁压仪竖立于地面调平，检查并接通管路，注水排出旁压器中腔和水管中的气体。

7 将旁压器中腔和量管水位相平，根据不同深度调整压差阀，使中腔与上腔、下腔的压力差保持恒定。

8 将旁压器放入钻孔中预定的试验深度，其深度以中腔中

点为准。打开量管阀和辅管阀施加压力。

9 接上氮气加压装置导管，把减压阀按逆时针方向拧到最松位置，打开气源阀，按顺时针方向调节减压阀，使输出压力降低到比所需最高试验压力大 100kPa~200kPa。

10 单级压力增量宜为预计极限压力的 $1/14 \sim 1/10$ ，当不能确定预计极限压力时，旁压试验每级加载压力可按表 7.7.4 选用。

表 7.7.4 旁压试验每级加载压力

岩 土 的 类 别	每级加载压力 (kPa)	
	临塑压力前	临塑压力后
淤泥、淤泥质土、流塑状态的黏性土、饱和或松散粉砂和细砂	≤ 15	≤ 30
软塑状的黏性土、稍密饱和的粉土、稍密的粉砂和细砂，稍密的中粗砂	15~25	30~50
可塑至软塑状态的黏性土，中密至密实的饱和粉土、中密至密实的粉砂和细砂，中密的中砂和粗砂	25~50	50~100
硬塑至坚硬状态的黏性土，密实的粉土、密实的中砂和粗砂、残积土	50~100	100~200
中密至密实的碎石类土、极软岩、软岩的强风化带	≥ 100	≥ 200
软岩	≥ 200	≥ 500

11 各级压力下的相对稳定时间标准为 1min 或 3min。维持 1min 时，加荷后 15s、30s、60s 测读变形量；维持 3min 时，加荷后 30s、60s、120s、180s 测读变形量。同时应记录测试时的潮位。

12 当旁压器测量腔的扩张体积相当于仪表量测腔的固有体积时，或试验压力达到仪器的容许最大压力时，应立即终止试验。

13 试验结束后应采用下列方法将橡胶膜恢复原状：

1) 试验深度小于 2m 时，按逆时针方向将调压阀拧到最松位置，利用橡胶膜的约束力回水至量管和辅管，

当水位接近零时，可关闭量管阀和辅管阀。

2) 试验深度大于 2m 时，打开水箱安全盖，再打开注水阀，利用试验压力使旁压器回水至水箱。

3) 当需排净旁压器内的水时，可打开排水阀，利用试验压力排净旁压器内的水。也可采用真空泵吸回水。

14 终止试验消压后，应等 2min~3min 后再取出旁压器。

7.7.5 预钻式旁压试验成果整理与分析应符合下列规定：

1 校正后的压力应按下列式计算：

$$p = p_m + p_w - p_i \quad (7.7.5-1)$$

式中： p ——校正后的压力 (kPa)；

p_m ——压力表读数 (kPa)；

p_w ——静水压力 (kPa)；

p_i ——橡胶膜约束力 (kPa)，查橡胶膜约束力校正曲线。

2 校正后体变量应按下列公式计算：

$$V = H_x A \quad (7.7.5-2)$$

$$H_x = H_m - a(p_m + p_w) \quad (7.7.5-3)$$

式中： V ——校正后的体变量 (cm^3)；

H_x ——校正后的量管水位下降值 (cm)；

A ——量水管截面积 (cm^2)；

H_m ——量水管水位下降值 (cm)；

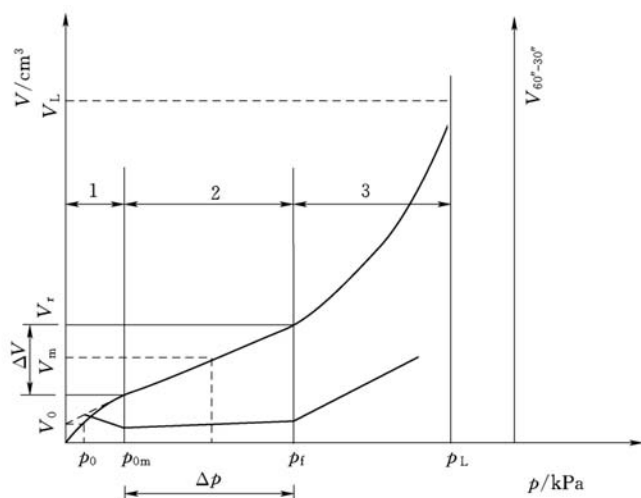
a ——仪器综合变形校正系数 (cm/kPa)。

3 应以校正后的体变 V 为纵坐标，校正后的压力 p 为横坐标，绘制 $p-V$ 曲线 (图 7.7.5)。

4 应根据绘制的 $p-V$ 曲线，确定以下三个压力特征值：

1) 将旁压曲线直线段延长与纵坐标相交，交点为 V_0 ，由 V_0 作与 p 轴平行线相交于曲线的一点，其对应的压力取为原位水平土压力 p_0 值。

2) 旁压曲线直线段的终点所对应的压力取为临塑压力 p_f 值。

图 7.7.5 $p-V$ 曲线

1—初始曲线段；2—弹性直线段；3—塑性屈服段； p_0 —原位水平土压力；
 p_{0m} —线性段起始点压力； p_t —临塑压力； p_L —极限压力

3) 曲线过临塑压力后，趋向于与纵轴平行的渐近线时，其对应的压力为极限压力 p_L 值。当从 $p-V$ 曲线上不能直接求出极限压力 p_L 值时，可用曲线外推法求取，取对应 V_L 的压力为极限压力 p_L ，极限体积值可按式计算：

$$V_L = V_c + 2V_0 \quad (7.7.5-4)$$

式中： V_L ——极限体积值 (cm^3)；

V_c ——旁压器中腔的固有体积 (cm^3)；

V_0 ——初始体变量，孔穴体积与旁压器中腔固有体积的差值 (cm^3)。

5 旁压模量可按式计算：

$$E_m = 2(1+\mu)(V_c + V_m) \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (7.7.5-5)$$

式中： E_m ——旁压模量（kPa）；

μ ——泊松比；

Δp ——旁压试验曲线上直线变形段的压力增量（kPa）；

ΔV ——相应于 Δp 的体积增量（ cm^3 ）；

V_m ——平均体积增量（ cm^3 ），取旁压试验曲线直线段两点间压力所对应的体积之和的 $1/2$ 。

6 根据 $p-V$ 曲线可推算地基承载力、黏性土不排水抗剪强度和静止侧压力系数。

7.8 扁铲侧胀试验

7.8.1 扁铲侧胀试验可用于黏性土、粉土和松散～中密砂土。

7.8.2 扁铲侧胀试验可用于测定地基土的侧胀模量、侧胀水平应力指数、侧胀土性指数和侧胀孔压指数。

7.8.3 扁铲侧胀试验设备应主要包括测量系统、贯入系统和压力源，并应符合下列规定：

1 测量系统应包括侧胀板头、气电路和控制装置。

2 贯入系统应包括主机、探杆和附属工具，主机可采用地质钻机或静力触探主机。

3 压力源可采用普通或特制氮气瓶。压力源应安装压力调节器，高压气体应为干燥的氮气。

7.8.4 扁铲侧胀试验的板头应符合下列规定：

1 板头在平行于轴线长度内，弯曲度不应大于 0.3% 。

2 板头前缘偏离轴线不应超过 1mm 。

3 板头应用高强度不锈钢锻制，厚度 15mm 、宽度 95mm ，误差不应超过 1% ；长度为 235mm ，误差不应超过 2% 。

4 圆形不锈钢膜片直径 60mm ，平装于板头一侧板面上；膜片内侧设置的三位电开关应能准确显示膜片膨胀中的三个特征压力点。

7.8.5 扁铲侧胀试验的气电路应符合下列规定：

1 管路应由厚壁、小直径、耐高压、内部贯穿铜质导线的尼龙管组成。

2 管路两端接头绝缘性能良好，绝缘电阻不应小于 $50\text{M}\Omega$ ，直径不应超过 12mm 。

3 用于标定的长度宜为 1m 。

4 应能输送气压和准确地传递特定信号。

7.8.6 扁铲侧胀试验的控制装置应符合下列规定：

1 压力表显示的有效最小分度值不宜大于 1kPa 。

2 传送膜片达特定位移量时的信号应采用蜂鸣器和检流计显示。蜂鸣器和检流计应在膜片膨胀量为 0.05mm 和 1.10mm 测读对应的压力值。

3 与气电管路、气压计、校正器等附件组成的标定装置应能精确测定膜片膨胀阶段。

7.8.7 试验前应对扁铲探头膜片进行标定。每孔试验结束时应立即提升探杆，取出侧胀板头，并对膜片进行再标定。

7.8.8 扁铲侧胀试验的准备工作应符合下列要求：

1 拉直管路，使管路滑行穿过探杆，防止管路被绞扭和弯伤。

2 将管路一端与侧胀板头连接，通过变径接头和所用探杆一次穿齐。

3 检查控制装置、压力源，并将管路的另一端与控制装置对应的插座接上。

4 将地线接到地线插座上，另一端夹到探杆或主机的机座上。

5 检查电路是否正常。

7.8.9 扁铲侧胀试验应符合下列规定：

1 贯入设备的能力应满足试验深度的需要，贯入过程中保持匀速，速率不宜大于 2cm/s 。

2 试验时应使机座保持水平状态，并始终用水平尺校验，

记录每次试验中试验孔的垂直度，试验孔的垂直度应小于 2%。

3 水上试验应有保证与孔位对准的稳定措施；水底以上部位，宜加设防止探杆压杆失稳的装置。

4 试验深度应以膜片中心为参照点，计深标尺设置在贯入主机上，贯入深度应以板头、探杆入土的实际深度为准，每贯入 3m~4m 校核一次。

5 扁铲侧胀试验及压力值测读应采用下列方法：

- 1) 侧胀板头贯入至预定深度，蜂鸣器鸣响，关闭排气阀，慢慢打开微调阀，缓慢增加压力，在蜂鸣器和电流计停止响动瞬间，读取压力 A 值。
- 2) 压力从 0 到 A ，加压时间应控制在 15s 内。
- 3) 记录 A 值后，继续匀速加压，待蜂鸣器鸣响瞬间，读取压力 B 值，从 A 加压到 B 的时间控制在 15s 内。
- 4) 记录 B 值后，应快速减压至蜂鸣器停响为止，再缓缓卸掉剩余压力，蜂鸣器再响时，读取压力 C 值。
- 5) 试验点间距宜为 20cm~25cm。

6 遇下列情况时应停止试验，并予以注明：

- 1) 贯入主机的负荷达到其额定荷载的 120%，或探杆出现明显弯曲，反力装置失效。
- 2) 无反应信号或测不到压力 B 值或 B 值时有时无。
- 3) 气电管路破裂或被堵塞。

7 试验完毕后应打开排气阀，避免损坏膜片，应及时检查气电管路，做好标记，给管路两端接头戴上盖帽，防止污物进入。

7.8.10 板头内未进水和泥浆、膜片表面完好、标定值在适用范围内时，清除板头上粘附的泥土，可继续使用，否则应拆卸、保养和清洁，重新标定。膜片表面严重划伤、皱折及破裂，标定值达不到规定要求，过度膨胀，加力和放松时会发出“劈啪”响声时，应更换膜片。

7.8.11 扁铲侧胀试验资料整理与分析应符合下列规定：

1 扁铲侧胀试验数据应按下列公式计算：

$$p_0 = 1.05 \times (A - Z_m + \Delta A) - 0.05 \times (B - Z_m - \Delta B) \quad (7.8.11-1)$$

$$p_1 = B - Z_m - \Delta B \quad (7.8.11-2)$$

$$p_2 = C - Z_m + \Delta A \quad (7.8.11-3)$$

式中： p_0 ——膜片向土中膨胀之前作用在膜片上的接触压力 (kPa)；

p_1 ——膜片膨胀 1.10mm 时的膨胀压力 (kPa)；

p_2 ——膜片回到 0.05mm 时的终止压力 (kPa)；

A ——膜片膨胀 0.05mm 时气压的实测值 (kPa)；

B ——膜片膨胀 1.10mm 时气压的实测值 (kPa)；

C ——膜片回到 0.05mm 时气压的实测值 (kPa)；

ΔA ——空气中标定膜片膨胀 0.05mm 时气压的实测值 (kPa)；

ΔB ——空气中标定膜片膨胀 1.10mm 时气压的实测值 (kPa)；

Z_m ——未调零时的初读数 (kPa)。

2 侧胀模量、水平应力指数、土性指数、孔压指数应按下列公式计算：

$$E_D = 34.7(p_1 - p_0) \quad (7.8.11-4)$$

$$K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0} \quad (7.8.11-5)$$

$$I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0) \quad (7.8.11-6)$$

$$U_D = (p_2 - u_0) / (p_0 - u_0) \quad (7.8.11-7)$$

式中： E_D ——侧胀模量 (kPa)；

K_D ——侧胀水平应力指数；

I_D ——侧胀土性指数；

U_D ——侧胀孔压指数；

σ'_{v0} ——土的有效自重压力 (kPa)；

u_0 ——土的静水压力 (kPa)。

3 绘制 p_0 、 p_1 、 p_2 、 $p_1 - p_0$ 、 E_D 、 K_D 、 I_D 、 U_D 随深度的分布曲线。

7.9 现场载荷试验

7.9.1 现场载荷试验可用于测定滩涂区土体的地基承载力特征值和变形模量。

7.9.2 现场载荷试验应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

7.10 现场直剪试验

7.10.1 现场直剪试验可用于测定滩涂区土体抗剪强度。

7.10.2 现场直剪试验应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

7.11 钻孔弹模试验

7.11.1 钻孔弹模试验宜采用钻孔千斤顶法，可用于测定硬黏土、密实砂土和岩体的弹性模量。

7.11.2 钻孔弹模试验的仪器设备应符合下列规定：

1 钻孔弹模仪（图 7.11.2-1）应主要包括钻孔千斤顶、液压泵、压力表、输压管、测量装置和信号线缆等。

2 钻孔千斤顶（图 7.11.2-2）应主要包括位移传感器、液压筒、承压板及球型调节座，钻孔孔径宜比钻孔千斤顶直径大 5mm~8mm。

3 承压板可由并联的液压筒施压，宜布置多个位移传感器，记录承压板间的相对倾斜程度；当承压板无相对倾斜时，可仅布置一个位移传感器。

4 位移传感器的最小分度值不应大于 0.01mm。

7.11.3 试点应符合下列规定：

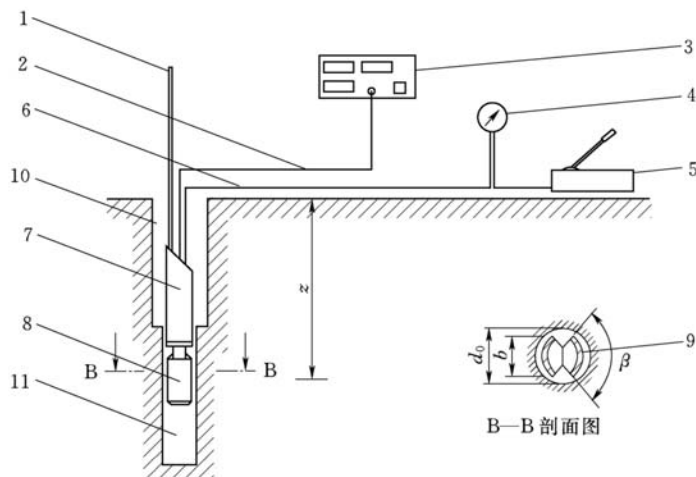


图 7.11.2-1 钻孔弹模仪

1—探杆；2—信号线缆；3—测量装置；4—压力表；5—液压泵；6—输压管；
7—沉积物收集管；8—钻孔千斤顶；9—承压板；10—钻孔；11—试验腔

- 1 钻孔应采用金刚石钻头钻进孔壁应平直光滑。
- 2 试验段岩土性质应基本一致。
- 3 相邻两加压段边缘之间的距离应大于 1 倍加压段长。

7.11.4 钻孔弹模试验的操作步骤应符合下列规定：

1 在进行钻孔弹模试验前，应对加压系统进行摩擦效应修正。将仪器竖直放置，打开液压筒，缓慢加压至液压筒开始产生位移，此时压力表读数为液压筒的摩擦效应修正值。

2 当钻孔孔壁不稳定时，宜用护筒对钻孔进行护壁。护筒宜放置于试验点位以上 1.0m 位置，根据钻孔千斤顶尺寸开挖试验腔，试验腔深度宜为 3m，将钻孔千斤顶放置于试验腔内，钻孔千斤顶上下端距离试验腔顶部和底部宜大于 0.5m。

3 试验应包括加载、卸载和重加载三个过程，且至少应进行三次加载/卸载循环。加载时宜取预计最大压力的 2%~5% 作为初始压力，最大压力值应根据上部结构的最大设计荷载确定。

4 加卸载应采用阶梯状加卸载(图 7.11.4) 方式进行。每个加载或卸载过程宜分为 5 级~8 级, 每级压力宜维持 1min~3min, 在压力表读数稳定后进行下一级加载或卸载。记录每级加、卸载时的压力表读数和承压板位移。

5 当出现下列情况之一时, 应终止加载:

- 1) 达到最大压力值;
- 2) 承压板达到最大位移;
- 3) 两侧承压板夹角达到 3° 。

6 试验结束后, 钻孔回填应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

7.11.5 试验点岩土体的弹性模量应按下列公式计算:

1 平均接触应力应按下式计算:

$$p_c = \frac{F}{A} \quad (7.11.5-1)$$

$$F = nA_c(q - r_c) \quad (7.11.5-2)$$

式中: p_c ——平均接触应力 (MPa);

A ——承压板在荷载作用方向的投影面积 (m^2);

F ——作用在承压板上的压力值 (MN);

n ——液压筒个数;

q ——单个液压筒的压力值 (MPa);

A_c ——单个液压筒的筒腔横截面积 (m^2);

r_c ——液压筒摩擦效应修正值 (MPa)。

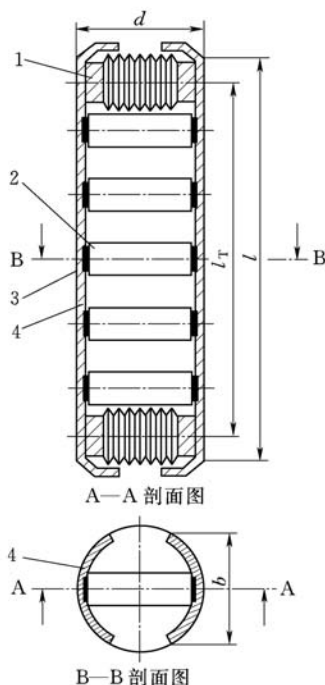


图 7.11.2-2 钻孔千斤顶示意图

1—位移传感器; 2—液压筒;
3—球型调节座; 4—承压板

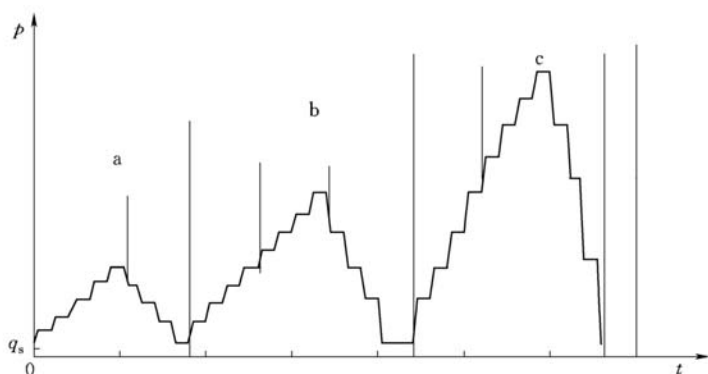


图 7.11.4 阶梯状加卸载图

2 钻孔弹性模量应按下式计算：

$$E_B = f \cdot \frac{d_c}{\Delta e_i} \cdot \Delta p_{ci} \quad (7.11.5-3)$$

式中： E_B ——钻孔弹性模量（MPa）；

f ——钻孔千斤顶修正系数（表 7.11.5）；

d_c ——当前试验腔直径（mm）；

Δp_{ci} ——平均接触应力的变化量（MPa）；

Δe_i ——与平均接触应力变化量相对应的承压板位移变化量（mm）。

表 7.11.5 钻孔千斤顶修正系数

设备类型 编号	张角 $\beta(^{\circ})$	钻孔千斤 顶长度 $l(\text{m})$	钻孔千斤 顶外径 $d(\text{m})$	钻孔千斤顶修正系数 f		
				泊松比 $\mu=0.25$	泊松比 $\mu=0.30$	泊松比 $\mu=0.40$
1	120	0.195	0.146	0.792	0.785	0.749
2	120	0.220	0.146	0.827	0.822	0.785
3	120	0.490	0.146	0.960	0.949	0.898
4	130	0.490	0.146	0.894	0.885	0.834

续表 7.11.5

设备类型 编号	张角 $\beta(^{\circ})$	钻孔千斤 顶长度 $l(\text{m})$	钻孔千斤 顶外径 $d(\text{m})$	钻孔千斤顶修正系数 f		
				泊松比 $\mu=0.25$	泊松比 $\mu=0.30$	泊松比 $\mu=0.40$
5	120	0.785	0.146	1.017	1.005	0.946
6	130	0.340	0.096	0.820	0.808	0.748
7	120	0.490	0.101	0.986	0.972	0.904

7.11.6 钻孔弹模试验记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.21 的格式。

7.12 波速测试

I 一般规定

7.12.1 波速测试可选择单孔法或跨孔法，测试参数宜包括岩土层的剪切波速度和纵波速度。单孔法可选择单孔悬挂法或单孔检层法。

7.12.2 单孔悬挂法可用于土层的剪切波速度测试；单孔检层法和跨孔法可用于岩土层剪切波速度和纵波速度测试。岩体波速可采用一发一收的单孔声波测试或穿透声波测试。

7.12.3 波速测试仪器设备应主要包括震源激发设备、信号接收设备和主机。

7.12.4 震源激发设备应符合下列要求：

- 1 单孔悬挂法宜采用全密封电磁式激震源。
- 2 单孔检层法地表激振的剪切波震源应采用重锤和承重木板，纵波震源宜采用重锤和承重金属板。
- 3 跨孔法孔内剪切波震源宜采用剪切锤，纵波震源宜采用电火花。

4 岩体声波测试的激发换能器宜采用压电陶瓷或超磁致震源。

7.12.5 信号接收设备应符合下列规定：

1 采用速度型检波器或接收换能器，其固有频率宜小于有效波主频的 $1/2$ 。

2 检波器或接收换能器之间的固有频率差不应大于 0.1Hz ，灵敏度和阻尼系数差别不应大于 10% 。

3 孔内三分量检波器和岩体声波测试接收换能器的水密性不应小于 1MPa ，悬挂式换能器的水密性不应小于 3MPa 。

4 孔内三分量检波器应由一个竖直向和两个水平向检波器分别接收三个相互垂直方向的弹性波。

7.12.6 波速测试仪器主机应符合下列规定：

1 单孔悬挂法仪器主机宜采用悬挂式波速测井仪；单孔检层法和跨孔法仪器主机宜采用地震仪；岩体声波测试仪器主机宜采用声波仪。

2 通频带应满足有效波的频率范围要求。

3 仪器动态范围不应低于 96dB ，模数转换器（A/D）的位数不宜小于 16 位。

4 各通道的幅度和相位应一致。

5 悬挂式波速测井仪每道采样点数不应少于 512，最小采样间隔不应大于 0.05ms 。

6 声波仪每道采样点数不应少于 512，最小采样间隔不应大于 $0.1\mu\text{s}$ 。

7 地震仪每道采样点数不应少于 1024，最小采样间隔不应大于 0.025ms 。

7.12.7 钻孔应竖直。孔深大于 15m 的钻孔宜测斜，测斜仪应能测 $0^\circ\sim 360^\circ$ 的方位角及 $0^\circ\sim 30^\circ$ 的倾角，方位角的测试误差不宜大于 1° ，倾角的测试误差不宜大于 0.1° 。

7.12.8 单孔悬挂法和岩体声波测试应在裸孔内进行。单孔检层法和跨孔法可采用套管护壁。

7.12.9 波速测试成果整理应符合下列规定：

1 土层等效剪切波速度可按下列公式计算：

$$V_{sc} = \frac{d_0}{t} \quad (7.12.9-1)$$

$$t = \sum_{j=1}^n \left(\frac{d_j}{\bar{V}_{sj}} \right) \quad (7.12.9-2)$$

式中： V_{sc} ——土层等效剪切波速度（m/s）；

d_0 ——计算深度（m），该值需要取覆盖层厚度和 20m 二者的较小值；

d_j ——计算深度范围内第 j 土层的厚度（m）；

t ——剪切波在地面至计算深度之间的传播时间（s）；

\bar{V}_{sj} ——计算深度范围内第 j 土层的平均剪切波速度（m/s）；

n ——计算深度范围内土层的分层数。

2 地层平均波速可按下式计算：

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}} \quad (7.12.9-3)$$

式中： \bar{V} ——地层平均波速（m/s）；

h_i ——第 i 层地层厚度（m）；

V_i ——第 i 层地层波速（m/s）；

n ——计算深度范围内地层的分层数。

II 单孔法

7.12.10 单孔法测试前的准备工作应符合下列规定：

1 使用通孔器进行通孔，确保钻孔内部畅通，并确认孔内水位及孔深。钻孔孔口应用软物包扎，保护孔内设备不受损坏或防止异物掉落。

2 采用锤击木板作为地表剪切波震源时，木板上应压重物，木板的长度中垂线应对准测试孔中心，孔口与木板的水平距离宜为 1m~3m，木板与地面应紧密接触。

3 当纵波测试采用锤击金属板时，金属板距孔口的水平距

离宜为 1m~3m, 金属板与地面应紧密接触。

7.12.11 单孔法测试应符合下列规定:

1 单孔悬挂法和单孔检层法宜每隔 0.5m~1.0m 布置一个测点, 现场观测到层位变化处应加密, 并宜自下而上按预定深度进行测试, 每点测试次数不宜少于 3 次。

2 单孔检层法检波器应在测试孔内预定深度处贴壁固定, 沿木板纵轴方向分别敲击两端, 记录极性相反的两组剪切波波形。

3 单孔悬挂法应将收发换能器及电缆匀速地放入钻孔底部, 待收发换能器稳定后自下而上测试。

4 纵波测试可锤击金属板, 当激振能量不足时, 可采用爆炸震源。

7.12.12 单孔法测试成果整理应符合下列规定:

1 单孔悬挂法剪切波速应按下式计算:

$$V = \frac{L}{T_2 - T_1} \quad (7.12.12-1)$$

式中: V ——剪切波波速 (m/s);

T_1 ——剪切波到达第 1 个接收换能器的时间 (s);

T_2 ——剪切波到达第 2 个接收换能器的时间 (s);

L ——两个接收换能器之间的距离 (m)。

2 单孔检层法剪切波或纵波的旅行时间和波速, 应按下列公式计算:

$$t'_i = \frac{h_i}{\sqrt{d^2 + h_i^2}} t_i \quad (7.12.12-2)$$

$$V_i = \frac{h_i - h_{i-1}}{t'_i - t'_{i-1}} \quad (7.12.12-3)$$

式中: t_i ——激发点至接收点剪切波或纵波的旅行时间 (s);

t'_i ——垂直距离修正后剪切波或纵波的旅行时间 (s);

h_i ——接收点深度 (m);

d ——从震源至孔口的水平距离 (m)。

III 跨孔法

7.12.13 跨孔法测试孔的布置应符合下列规定：

1 一组测试宜布置 3 个竖直孔，且 3 孔位于同一剖面上，2 个接收孔宜在激发孔的同一侧。

2 测试只有两个孔时，应对数据采集系统和激发系统的延时误差进行校验。

3 土层介质的测试孔间距宜为 2m~4m。在保证直达波首先到达检波器的前提下，孔间距可根据土层性质和测试要求等进行调整。

7.12.14 跨孔法测试应符合下列规定：

1 井下剪切锤应用贴壁装置固定。

2 从地面往下 0.4 倍孔距处为第 1 个测点进行连续测试，测点距间隔宜为 1m~2m。每个测点宜测试 2 次~4 次。

3 每次测试时，震源和检波器应在同一高程上。

7.12.15 跨孔法剪切波波速和纵波波速，应按下列式计算：

$$V = \frac{\Delta S}{T_2 - T_1} \quad (7.12.15)$$

式中： T_1 ——剪切波或纵波到达第 1 个接收孔测点的时间 (s)；

T_2 ——剪切波或纵波到达第 2 个接收孔测点的时间 (s)；

ΔS ——两个接收孔测点距离之差 (m)。

7.12.16 跨孔法波速测试记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.22 的格式。

IV 岩体声波测试

7.12.17 岩体声波测试应符合下列规定：

1 单孔岩体声波测试应使用一发双收换能器，源距不宜小于 0.3m，换能器每次移动距离不应大于 0.2m。

2 单孔岩体声波测试时，应将收发换能器及电缆匀速地放入钻孔底部，待收发换能器稳定后自下而上测试。

3 穿透声波测试应量测两孔口中心点的距离，其相对误差应小于1%。

4 穿透声波测试应使用一发一收换能器，换能器每次移动距离宜为0.2m~1.0m，收发换能器的距离应进行核算。

7.12.18 岩体声波速度应按式(7.12.18)计算：

$$V = \frac{D}{T_2 - T_1} \quad (7.12.18)$$

式中： T_1 ——声波到达第1个接收换能器或接收孔测点的时间(s)；

T_2 ——声波到达第2个接收换能器或接收孔测点的时间(s)；

D ——两个接收换能器或接收孔测点之间的距离(m)。

7.12.19 应绘制声波速度随深度的变化曲线。

7.13 电 阻 率 测 试

I 一 般 规 定

7.13.1 地层电阻率宜采用电阻率测井法或电测深法测试。

7.13.2 电阻率测试仪器设备应主要包括电法仪、电极、电缆和供电电源。

7.13.3 应对仪器和导线及线路联通状况进行检查，有漏电现象时应消除故障后重新测试。

7.13.4 电阻率测试的资料整理与解译应符合下列要求：

1 电阻率解译图绘制应注明装置长度和点距等参数。

2 同一工区的电阻率解译图应采用相同的比例尺，宜绘制剖面成果图。

3 应充分研究测线附近的地形、地质条件及干扰体的位置与异常的关系，区分异常和干扰。

4 应统计并分析地层电阻率与埋深的对应关系。

II 电 阻 率 测 井 法

7.13.5 电阻率测井法可用于钻孔地层电阻率测试。

7.13.6 电阻率测井法应在无套管、有井液的孔段进行测试，测区内应无较强的工业游散电流或电磁干扰。

7.13.7 电阻率测井装置（图 7.13.7）宜采用三极装置或对称四极装置。三极装置测量极距 MN 与供电电极 A 至记录点的距离 AO 的比值宜在 $1/3 \sim 1/5$ 之间。对称四极装置测量极距 MN 与供电电极距 AB 的比值宜在 $1/3 \sim 1/5$ 之间。

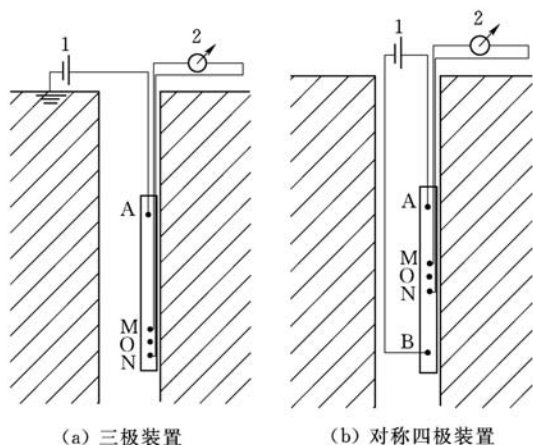


图 7.13.7 电阻率测井装置

1—电源；2—检流计；A、B—供电电极；

M、N—测量电极；O—MN 中点

7.13.8 电阻率测井法成果整理应符合下列规定：

1 测点的电阻率可按下列公式计算：

$$\rho_s = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (7.13.8-1)$$

$$\text{三极装置时, } K = 4\pi \cdot \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad (7.13.8-2)$$

$$\text{对称四极装置时, } K = 2\pi \cdot \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad (7.13.8-3)$$

式中： ρ_s ——电阻率（ $\Omega \cdot m$ ）；

ΔV ——MN 两点间的电位差 (mV);

I ——电流强度 (mA)

K ——装置系数 (m)。

2 应绘制电阻率值沿孔深的变化曲线,电阻率测井曲线应与钻孔柱状图相对应。

III 电 测 深 法

7.13.9 电测深法宜采用对称四极装置 (图 7.13.9),可用于测量层状和似层状地层的电阻率。

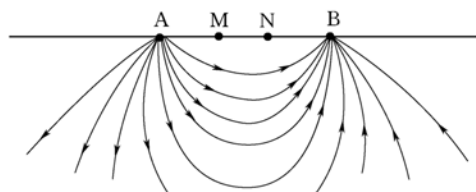


图 7.13.9 对称四极装置

A、B—供电电极; M、N—测量电极

7.13.10 电测深法的适用条件应符合下列规定:

- 1 各地层电性稳定,且电性差异明显。
- 2 被探测的各地层有一定规模和厚度,有稳定的电性标志层,无极高或极低电阻屏蔽层,且电性层数不宜过多。
- 3 基岩或被探测岩层层面与地面交角小于 20° 。
- 4 测区内无较强的工业游散电流或电磁干扰。

7.13.11 电测深法测试应符合下列规定:

1 手动测量供电时间不少于 1s,自动测量供电时间不少于 0.5s。自动测量时,对称四极装置宜采用“A→B、B→A、A→B”的供电测量方式。

2 当测深点上某一极距出现数据不稳定、电位差小于 3mV 或电流强度小于 3mA 时,应重复观测,次数不宜少于 3 次。

3 应对被检查测深点的所有极距进行检查观测。

4 重复观测和检查观测应改变供电电压或改善电极接地条件。

5 对同一组测深点进行重复观测时，应以观测和重复观测数据的平均值作为该点的观测值。

7.13.12 电测深法测试极距选择应符合下列规定：

1 供电极距 AB 在对数坐标系下宜均匀分布，相邻极距比值宜在 1.2~1.8 之间，宜按等差级数增加电极距。

2 最小 AB 应能测量出第一层的电阻率，AB/2 宜为 1.5m；最大供电极距应使电测深曲线后支反映标志层的上升或下降曲线的“拐点”后不少于 3 个点。

3 测量极距 MN 与供电极距 AB 的比值应在 1/3~1/30 之间。

7.13.13 电测深法测试成果整理与分析应符合下列规定：

1 测点电阻率可按下列公式计算：

$$\rho_s = K \times \frac{\Delta V}{I} \quad (7.13.13-1)$$

$$K = \pi \times \frac{AM \times AN}{MN} \quad (7.13.13-2)$$

式中： ρ_s ——电阻率 ($\Omega \cdot m$)；

ΔV ——MN 两点间的电位差 (mV)；

I ——电流强度 (mA)；

K ——对称四极装置系数 (m)。

2 地形起伏较大时，应考虑地形影响，并作地形校正。

3 电测深资料解译可选用模拟正反演法、量板法或特征点法，确定各地层的厚度和电阻率值。

4 成果图件宜包括下列内容：

1) 工作布置图。

2) 电阻率断面图或平面图。

3) 电阻率测试地质解释剖面图或平面图。

8 水质分析

8.1 pH 值测定

8.1.1 pH 值的测定宜采用玻璃电极法，现场测定可采用笔式或携带式酸度计。

8.1.2 试验使用的 pH 计精度应为 0.01。

8.1.3 除另有说明外，试验试剂均应为分析纯，水应为去除二氧化碳的蒸馏水或纯水，试剂制备应符合下列规定：

1 磷酸二氢钾 (KH_2PO_4)、磷酸氢二钠 (Na_2HPO_4) 分别置于 $115^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 烘箱中烘 2h，于干燥器中冷却至室温。

2 十水四硼酸钠 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 置于盛有蔗糖饱和溶液的干燥器中 48h，并继续存于此干燥器中备用。

3 采用下列方法配制 pH 标准缓冲溶液：

- 1) 配制混合磷酸盐标准缓冲溶液。称取 3.39g 磷酸二氢钾和 3.55g 磷酸氢二钠溶于水中并稀释至 1000mL，加 1mL 三氯甲烷混匀，将获得的标准缓冲溶液保存于聚乙烯瓶中。使用期三个月。
- 2) 配制十水四硼酸钠标准缓冲溶液。称取 3.80g 十水四硼酸钠溶于刚煮沸冷却的蒸馏水中，并稀释至 1000mL，加 1.0mL 三氯甲烷混匀，保存于聚乙烯瓶中，瓶口用石蜡密封。开瓶后使用期不应超过一个星期。
- 3) 使用时应采用测定溶液温度下的标准 pH 值，标准缓冲溶液的 pH 值见表 8.1.3。

表 8.1.3 标准缓冲溶液的 pH 值

温度 (°C)	混合磷酸盐 (1:1) (磷酸二氢钾: 0.0250mol/L) (磷酸氢二钠: 0.0250mol/L)	十水四硼酸钠 (0.0100mol/L)
0	6.981	9.458
5	6.949	9.391
10	6.921	9.330
15	6.898	9.276
20	6.879	9.220
25	6.864	9.182
30	6.852	9.142
35	6.844	9.105
40	6.838	9.072
45	6.834	9.042

4 配制饱和氯化钾溶液。称取 40g 氯化钾 (KCl)，加 100mL 水，充分搅拌后，将该溶液连同未溶解的氯化钾全部转移入试剂瓶中。

5 配制氯化汞溶液。称取 2.5g 氯化汞 (HgCl_2) 溶于水中并稀释至 100mL，混匀，盛于棕色试剂瓶中。

注：氯化汞 (HgCl_2) 为剧毒物质。

8.1.4 pH 值的测定应符合下列规定：

1 水样瓶应采用容积约 50mL 具有双层盖的广口聚乙烯瓶。应用少量水样洗涤水样瓶两次，慢慢地注满水样，立即旋紧瓶盖，存于阴暗处，放置时间不应超过 2h。对 2h 内不测定的水样，应加入 1 滴氯化汞溶液稳定，旋紧瓶盖，混合均匀。有效保存时间为 24h。

2 电极对在使用前，球泡应浸泡在饱和氯化钾溶液内。

3 将 pH 计上温度补偿器刻度调至与溶液温度一致。pH 计应在溶液温度下分别用混合磷酸盐标准缓冲溶液和十水四硼酸钠

标准缓冲溶液反复校准，至电极电位平衡稳定。每次更换标准缓冲溶液时，应用蒸馏水冲洗电极，并用滤纸吸干。

4 pH 计校准后将电极对提起，移开标准缓冲溶液，用蒸馏水淋洗电极，并用滤纸将水吸干。将电极对浸入待测水样中，使电极电位充分平衡，待仪器读数稳定后，记下水样温度和 pH 值读数。

8.1.5 现场 pH 值计算应符合下列规定：

1 水深不大于 500m 时，现场 pH 值应按下列式计算：

$$\text{pH}_w = \text{pH}_m + \alpha(t_m - t_w) \quad (8.1.5-1)$$

式中： pH_w 、 pH_m ——现场和测定时的 pH 值；

t_w 、 t_m ——现场和测定时的水温（℃）；

α ——温度校正系数；

$\alpha(t_m - t_w)$ ——pH 测定的温度校正值，可由表 8.1.5-1 查得。

表 8.1.5-1 pH 测定的温度校正值 $\alpha(t_m - t_w)$ 表

$t_m - t_w$ (℃)	pH_m											
	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6
1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
3	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
4	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05
5	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
6	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
7	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08
8	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10
9	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11
10	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12
11	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13

续表 8.1.5-1

$t_m - t_w$ (℃)	pH _m											
	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6
12	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14
13	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16
14	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17
15	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18
16	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19
17	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.20
18	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17	0.18	0.19	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22
19	0.15	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23
20	0.16	0.17	0.18	0.19	0.19	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.23	0.24
21	0.17	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25
22	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.22	0.23	0.23	0.24	0.25	0.26	0.26
23	0.19	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28
24	0.20	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29
25	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.26	0.28	0.28	0.29	0.30

2 水深大于 500m 时，需作压力校正，现场 pH 值应按下式计算：

$$\text{pH}_w = \text{pH}_m + \alpha(t_m - t_w) - \beta d \quad (8.1.5-2)$$

式中： β ——压力校正系数，可由表 8.1.5-2 查得；

d ——水样深度 (m)。

表 8.1.5-2 pH 测定的压力校正系数 β 表

pH _m	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4
$\beta \times 10^4$	35	31	28	25	23	22	21	20	20	20

8.1.6 水的 pH 值试验记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.23 的格式。

8.2 钙、镁离子测定

8.2.1 钙、镁离子可采用 EDTA 滴定法和火焰原子吸收分光光度法及电感耦合等离子体发射光谱法测定。各测定方法的适用范围应符合下列规定：

1 EDTA 滴定法测定钙离子含量的范围为 2mg/L～100mg/L，钙离子含量超过 100mg/L 的水应稀释后测定；测定镁离子含量的范围为 2mg/L～200mg/L。

2 当采用 EDTA 法有干扰时，可改用火焰原子吸收分光光度法，测定钙离子含量范围为 0.1mg/L～6.0mg/L，镁离子含量 0.01mg/L～0.6mg/L。

3 电感耦合等离子体发射光谱法可同时测定样品中多元素的含量，测定钙、镁离子测定范围为 0.036mg/L～0.39mg/L。

8.2.2 钙、镁离子的测定方法应符合现行行业标准《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052 的有关规定。

8.3 氯离子测定

8.3.1 氯离子测定可采用硝酸银滴定法、硝酸汞滴定法、电位法、离子色谱法和离子选择电极流动注射法。各测定方法应符合下列规定：

1 硝酸银滴定法可用于海水，可测定氯离子含量范围为 200mg/L～20000mg/L。浓度为 2000mg/L 时，相对误差为 $\pm 1.0\%$ ；浓度为 18000mg/L 时，相对误差为 $\pm 0.15\%$ ，标准偏差为 $\pm 0.10\%$ 。

2 硝酸汞滴定法可测定氯离子含量范围为 2.00mg/L～100mg/L，浓度更高的水样应稀释后测定。

3 电位法可采用直接电位法、标准加入稀释法和电位滴定法，可用于测定氯离子含量 5mg/L 以上的水样。

4 当电导检测器的量程为 10 μ S，送样量为 25 μ L 时，离子

色谱法可测定氯离子的最低检出限为 20mg/L。

5 离子选择电极流动注射法可测定氯离子含量范围为 9.0mg/L~1000mg/L。

8.3.2 硝酸银滴定法的仪器应主要包括 10mL 海水吸量管、25mL 溶解氧滴定管、电磁搅拌器及包裹聚乙烯或玻璃的磁搅拌转子。

8.3.3 除另有说明外，硝酸银滴定法试剂均为分析纯，水为蒸馏水或纯水，试剂制备应符合下列规定：

1 配制 4.0g/L 的氢氧化钠溶液。称取 4.0g 氢氧化钠 (NaOH) 溶于水中，并用水稀释至 1000mL。

2 配制 0.1mol/L 的硝酸溶液。移取 1.0mL 质量密度为 1.42g/mL 的硝酸 (HNO_3)，用水稀释至 225mL。

3 配制 60g/L 的硝酸银溶液。称取 60.0g 硝酸银 (AgNO_3) 溶于水中，并用水稀释至 1000mL。贮于棕色瓶中，置于暗处备用，使用前进行标定。当硝酸银不纯或溶液久置后产生沉淀，可将上层清液倾出或滤去沉淀，标定后使用。

4 配制氯离子浓度为 19.86g/L 的氯化钠标准溶液。将优级纯的氯化钠在 450℃~500℃灼烧 1h，再在干燥器中冷却至室温，称取 32.74g，溶解于适量水中，全量转移至 1000mL 容量瓶中，用水稀释至标线并混匀。贮于具塞玻璃瓶中并盖紧。

5 配制 1.0g/L 的荧光黄钠盐溶液。称取 0.1g 荧光黄 ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_5$) 溶于 10mL 氢氧化钠溶液中，用 pH 试纸指示，以硝酸溶液中和至中性，用水稀释至 100mL，贮于棕色试剂瓶中。

6 配制淀粉溶液。称取可溶性淀粉 2.5g，用少量水调成糊状，加入 250mL 沸水中，再煮沸，冷却后贮于试剂瓶中。

7 配制荧光黄钠盐指示剂。量取 12.5mL 荧光黄钠盐溶液加入 250mL 淀粉溶液，再加入 0.25g 苯甲酸钠 ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COONa}$)，混匀后贮于棕色试剂瓶中。

8.3.4 硝酸银滴定法试验水样装取、预处理和贮存应符合下列

规定：

1 水样瓶可采用容积约 250mL 具塞、平底玻璃瓶，或 200mL 具有螺旋盖的广口聚乙烯瓶。使用前应用体积分数 1% 的盐酸浸泡 7 天，再用蒸馏水彻底洗净并晾干。

2 应用少量水样洗涤样品瓶两次，装取水样约 100mL，并立即盖紧瓶塞。有效保存时间为 3 天。

8.3.5 硝酸银溶液的标定应符合下列规定：

1 用氯化钠标准溶液洗涤海水吸量管两次，在三个 100mL 烧杯中各移入 10.00mL 氯化钠标准溶液，各加入 1.5mL 荧光黄钠盐指示剂，放入磁转子。

2 用硝酸银溶液洗涤滴定管两次，再注入硝酸银溶液至标线。

3 在电磁搅拌下进行滴定。当溶液变为玫瑰红色时，即为终点。读取滴定管体积读数，精确至 0.01mL。

4 每批样品测定前，均应进行硝酸银溶液标定。如长时间连续测定，宜每隔 4h 标定一次。若室温较稳定，可每隔 8h 标定一次。

8.3.6 硝酸银滴定法测定应符合下列规定：

1 样品应放置至其温度接近室温。

2 用少量水样洗涤海水吸量管两次，再吸取 10.00mL 水样于 100mL 烧杯中。

3 加入 1.5mL 荧光黄钠盐指示剂，放入磁转子，按第 8.3.5 条第 3 款进行滴定，读取滴定管体积读数。

4 每个水样应取双样平行测定，并取平均值。

8.3.7 硝酸银滴定法测定的氯离子浓度应按下式计算：

$$\rho_{\text{Cl}} = \frac{\rho_{\text{NaCl-Cl}} \times V_1 \times \bar{V}_w}{V_2 \times \bar{V}_s} \quad (8.3.7)$$

式中： ρ_{Cl} ——水样的氯离子浓度（g/L）；

$\rho_{\text{NaCl-Cl}}$ ——氯化钠标准溶液中氯离子的浓度（g/L）；

V_1 ——标定硝酸银溶液时，使用的氯化钠标准溶液体积 (mL)；

\bar{V}_w ——水样滴定时，消耗的硝酸银溶液体积平均值 (mL)；

V_2 ——水样体积 (mL)；

\bar{V}_s ——标定硝酸银标准溶液时，消耗的硝酸银溶液体积的平均值 (mL)。

8.3.8 硝酸银滴定法氯离子试验的记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.24 的格式。

8.3.9 硝酸汞滴定法、电位法、离子色谱法、离子选择电极流动注射法可按现行行业标准《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052 的有关规定执行。

8.4 硫酸根离子测定

8.4.1 硫酸根离子测定可采用 EDTA-2Na 滴定法、硫酸钡重量法、铬酸钡分光光度法、硫酸钡浊度法、离子色谱法和铬酸钡间接原子吸收法。各测定方法的适用范围应符合下列规定：

1 EDTA-2Na 滴定法测定硫酸根离子含量范围为 10mg/L～400mg/L。

2 硫酸钡重量法测定硫酸根离子含量范围为 10mg/L～5000mg/L。

3 铬酸钡分光光度法可用于清洁的地表水和地下水，测定硫酸根离子含量范围为 10mg/L～100mg/L。

4 硫酸钡浊度法可用于低含量硫酸根离子的快速测定，测定硫酸根离子含量范围为 10mg/L～100mg/L。

5 当电导检测器的量程为 10 μ S，送样量为 25 μ L 时，离子色谱法测定硫酸根离子的最低检出限为 0.09mg/mL。

6 铬酸钡间接原子吸收法测定硫酸根离子含量范围为 0.2mg/L～12mg/L。

8.4.2 硫酸根离子的测定方法可按现行行业标准《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052 的有关规定执行。

8.5 游离二氧化碳测定

8.5.1 游离二氧化碳可采用酚酞指示剂滴定法测定。游离二氧化碳采样后应及时进行测定，水样应在低温、密封条件下保存。

8.5.2 游离二氧化碳的测定方法可按现行行业标准《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052 的有关规定执行。

8.6 侵蚀性二氧化碳测定

8.6.1 侵蚀性二氧化碳可采用酸滴定法或计算法测定。计算法可用于重碳酸盐碱度与总硬度之比为 0.75~1.25 的水样。在水中游离二氧化碳和 HCO_3^- 离子含量已测定的条件下，可用计算法复核实测值。

8.6.2 侵蚀性二氧化碳的测定方法可按现行行业标准《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052 的有关规定执行。

8.7 铵离子测定

8.7.1 铵离子测定可采用纳氏试剂分光光度法、蒸馏滴定法、水杨酸-次氯酸钠盐分光光度法、离子选择电极法和气相分子吸收光谱法。各测定方法的适用范围应符合下列规定：

1 纳氏试剂分光光度法可用于清洁的水样，浑浊水样应用硫酸锌-氢氧化钠溶液预处理后测定，可测定铵离子含量范围为 0.04mg/L~2.00mg/L。

2 蒸馏滴定法可测定铵离子含量范围为 0.2mg/L~1000mg/L，宜用于铵离子含量大于 2.0mg/L 的水样。

3 水杨酸-次氯酸钠盐分光光度法可测定铵离子含量范围为 0.05mg/L~1.00mg/L。

4 离子选择电极法可用于清洁的水样，可测定铵离子含量

范围为 0.1mg/L~1400mg/L。

5 气相分子吸收光谱法可测定铵离子含量范围为 0.08mg/L~100mg/L。

8.7.2 铵离子的测定方法可按现行行业标准《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052 的有关规定执行。

8.8 碱度测定

8.8.1 碱度测定可采用指示剂滴定法或电位滴定法。当水样浑浊、具色时，宜采用电位滴定法。

8.8.2 碱度的测定方法可按现行行业标准《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052 的有关规定执行。

8.9 钾、钠离子测定

8.9.1 钾、钠离子测定可采用火焰光度法和原子吸收光度法及电感耦合等离子发射光谱法。各测定方法的适用范围应符合下列规定：

1 火焰光度法测定钾、钠离子含量范围为 0.05mg/L~50.00mg/L。

2 原子吸收分光光度法在波长 766.5nm 处测定钾离子含量范围为 0.05mg/L~4.00mg/L；在波长 404.5nm 处测定钾离子含量范围为 1.0mg/L~300.0mg/L。在波长 589.0nm 处测定钠离子含量范围为 0.05mg/L~2.00mg/L；在波长 330.3nm 处测定钠离子含量范围为 0.5mg/L~200.0mg/L。

3 电感耦合等离子发射光谱法可同时测定样品中多元素的含量，在波长 766.49nm 处测定钾离子最低检出限为 0.5mg/L，在波长 589.59nm 处测定钠离子最低检出限为 0.2mg/L。

8.9.2 钾、钠离子测定方法可按现行行业标准《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052 的有关规定执行。

8.10 总矿化度测定

8.10.1 总矿化度测定应采用重量法。

8.10.2 总矿化度的测定方法可按现行行业标准《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052 的有关规定执行。

8.11 硫酸盐还原菌测定

8.11.1 硫酸盐还原菌测定宜采用绝迹稀释法。硫酸盐还原菌应在现场接种，室内培养，同时测定水温。

8.11.2 试验仪器设备应主要包括硫酸盐还原菌（SRB）测试瓶、量程 1mL 的无菌注射器、恒温培养箱、电热消毒器。

8.11.3 硫酸盐还原菌测定宜采用三次重复法，也可采用二次重复法，分析步骤应符合下列规定：

1 将数个装有硫酸盐还原菌培养基的测试瓶排成一组，并编上序号。用 75% 的酒精溶液将测试瓶盖顶及操作者的手进行消毒。

2 取样前应以 5L/min~6L/min 的流速畅流 3min 后取样，用 120℃ 下灭菌 20min 的无菌注射器取 1.0mL 水样注入 1 号瓶内，充分震荡。

3 用另一只无菌注射器从 1 号瓶内取 1.0mL 水样注入 2 号瓶内充分震荡。

4 更换一支无菌注射器从 2 号瓶中取 1.0mL 水样注入到 3 号瓶中，充分震荡。

5 依次类推一直稀释到最后一瓶为止，根据细菌含量决定稀释瓶数，宜稀释到 7 号瓶。

6 把上述测试瓶放入恒温培养箱中培养，温度控制在现场水温的 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 内，14 天~21 天后读数。

7 采用三次重复法时，每个水样、每个稀释倍数做 3 个平行试验；采用二次重复法时，每个水样、每个稀释倍数做 2 个平

行试验。

8.11.4 测试瓶中液体变黑或有黑色沉淀时，可确认有硫酸盐还原菌生长。

8.11.5 菌量计数宜采用下列方法：

1 采用三次重复法或二次重复法时，应记录每个稀释倍数下，对应的3组或2组平行试验中出现还原菌生长的测试瓶数。

2 选择出现有菌生长的最末相邻三个稀释倍数的测试瓶数，得到三位数生长指标，并按照稀释法三次重复菌量计数（表8.11.5-1）或稀释法二次重复菌量计数（表8.11.5-2）中读出对应的菌量值。将读出的菌量值乘以生长指标第一位对应的稀释倍数，即为水样中硫酸盐还原菌的含量。

表 8.11.5-1 稀释法三次重复菌量计数

生长指标	菌量 (个/mL)	生长指标	菌量 (个/mL)	生长指标	菌量 (个/mL)
000	0.0	201	1.4	302	6.5
001	0.3	202	2.0	310	4.5
010	0.3	210	1.5	311	7.5
011	0.6	211	2.0	312	11.5
020	0.6	212	3.0	313	16.0
100	0.4	220	2.0	320	9.5
101	0.7	221	3.0	321	15.0
102	1.1	222	3.5	322	20.0
110	0.7	223	4.0	323	30.0
111	1.1	230	3.0	330	25.0
120	1.1	231	3.5	331	45.0
121	1.5	232	4.0	332	110.0
130	1.6	300	2.5	333	140.0
200	0.9	301	4.0	—	—

表 8.11.5-2 稀释法二次重复菌量计数

生长指标	菌量 (个/mL)	生长指标	菌量 (个/mL)	生长指标	菌量 (个/mL)
000	0.0	110	1.3	211	13.0
001	0.5	111	2.0	212	20.0
010	0.5	120	2.0	220	25.0
011	0.9	121	3.0	221	70.0
020	0.9	200	2.5	222	110.0
100	0.6	201	5.0	—	—
101	1.2	210	6.0	—	—

9 土 质 分 析

9.1 pH 值 测 定

9.1.1 pH 值测定宜采用玻璃电极法。

9.1.2 试验仪器设备应主要包括精度为 0.01 的 pH 计或离子计、玻璃电极及其配套的饱和甘汞电极。

9.1.3 试验标准缓冲溶液应符合下列规定：

1 配制 0.0500mol/L 的邻苯二甲酸氢钾溶液 ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$)。称取经 105℃~110℃烘干的邻苯二甲酸氢钾 10.21g，通过漏斗用纯水冲洗入 1000mL 容量瓶中，定容至 1000mL。标准缓冲溶液的 pH 值可见表 9.1.3。

表 9.1.3 标准缓冲溶液的 pH 值

温度 (°C)	邻苯二甲酸氢钾 (0.0500mol/L)
0	4.006
5	3.999
10	3.999
15	3.996
20	3.998
25	4.003
30	4.010
35	4.019
40	4.029
45	4.042

2 配制磷酸二氢钾、磷酸氢二钠混合溶液应符合本规程第 8.1.3 条第 3 款的规定。

3 配制十水四硼酸钠溶液应符合本规程第 8.1.3 条第 3 款的规定。

4 配制标准缓冲溶液用蒸馏水应煮沸并加入 20mL 蒸馏水冷却,电导率小于 $2 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$,其 pH 值宜为 5.6~6.0。

9.1.4 pH 值测定步骤应符合下列规定:

1 对仪器进行预热、温度补偿调节、零点调节及校准,校准用的标准缓冲溶液应接近被测沉积物的 pH 值。

2 称取有代表性的新鲜湿土样约 20g,于 50mL 烧杯中加入 20mL 去除二氧化碳的蒸馏水,剔除硬物后搅成糊状,并在半小时内进行测定。

3 洗净电极,用滤纸吸去水分,插入搅匀后的样品,玻璃电极的球泡部分应全部浸入样品中,样品应稍高于甘汞电极的陶瓷芯端,放置平衡 30min 后读数,应重复测量至前后两次读数差值不超过 0.02。

9.1.5 土的 pH 值测定的记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.25 的格式。

9.2 易溶盐化学成分分析

9.2.1 易溶盐浸出液制取的主要仪器设备应符合下列规定:

- 1 分析筛孔径 2mm。
- 2 天平量程 200g,最小分度值 0.01g。
- 3 电动振荡器。
- 4 过滤设备包括抽滤瓶、平底瓷漏斗、真空泵。
- 5 离心机转速为 1000r/min。
- 6 广口瓶、容量瓶、角勺、玻璃棒、烘箱。

9.2.2 易溶盐浸出液制取步骤应符合下列规定:

1 根据土中含盐量和分析项目,称取过 2mm 筛下的风干试样 50g~100g,准确至 0.01g。置于广口瓶中,按土水比 1:5 加入纯水并搅匀,在振荡器上振荡 3min 后用 0.45 μm 滤膜抽气

过滤，另取试样 10g~15g 测定风干含水率。

2 将滤纸用纯水浸湿后贴在漏斗底部，漏斗装在抽滤瓶上，联通真空泵抽气，使滤纸与漏斗贴紧，将振荡后的试样悬液摇匀，倒入漏斗中抽气过滤，过滤时漏斗应用表面皿盖好。

3 滤液混浊时，应重新过滤。经反复过滤后仍然混浊时，应用离心机分离。滤液透明时为试样浸出液，贮于细口瓶中待用。

9.2.3 易溶盐总量的测定应符合现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 的有关规定。

9.2.4 钙、镁离子的试验方法应符合本规程第 8.2.1 条和第 8.2.2 条的规定；氯离子的试验方法应符合本规程第 8.3.1~8.3.9 条的规定；硫酸根离子的试验方法应符合本规程第 8.4.1 条和第 8.4.2 条的规定；碱度的试验方法应符合本规程第 8.8.1 条和第 8.8.2 条的规定；钾、钠离子的试验方法应符合本规程第 8.9.1 条和第 8.9.2 条的规定。

9.3 土质全量化学成分分析

I 等离子光谱法

9.3.1 试验可用于测定海底沉积物中主量及部分微量元素，主要包括 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 等元素，可根据测试需求增加其他元素。

9.3.2 试验所用主要试剂应包括分析纯标准以上的浓氢氟酸、浓硝酸、浓高氯酸、浓盐酸、过氧化氢，光谱纯金属、金属氧化物及其盐类配制成的各成分标准储备溶液或有证标准溶液，纯度不低于 99.99% 的氩气。

9.3.3 试验仪器应主要包括电感耦合等离子体原子发射光谱仪、自动控温电热板和最小分度值 0.01mg 的天平。

9.3.4 试验操作步骤应符合下列规定：

1 试样粒度应在 200 目以下，经充分干燥和混匀，再在

110℃干燥 5h，置于干燥器中，冷却至室温。

2 称取 0.1g 试样，精确至 0.1mg。

3 将试样置于聚四氟乙烯坩埚中，用数滴水润湿，加 10mL 氢氟酸，5mL 硝酸，2mL 高氯酸，于电热板上加热分解至高氯酸冒白烟并蒸至近干，取下冷却，用水冲洗坩埚壁，补加 2mL 高氯酸，继续加热至白烟冒尽，冷却后加 5mL 盐酸及数滴过氧化氢，加热使盐类溶解并使溶液清亮，冷却至室温，移入 50mL 容量瓶中，用水稀释至刻度并摇匀备测。

4 分别移取标准储备溶液，并按表 9.3.4 稀释配制成四组混合标准溶液（STD1、STD2、STD3、STD4），保持体积分数为 5% 的盐酸酸度；空白标准溶液应为体积分数 5% 的盐酸。

表 9.3.4 混合标准溶液各成分的浓度

成分	质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$)				
	STD1	STD2	STD3	STD4	空白标准溶液
Al_2O_3	50	100	200	300	0
CaO 、 Na_2O 、 Fe_2O_3	50	100	150	200	
MgO 、 K_2O	25	50	75	100	
TiO_2 、 P_2O_5 、 MnO	5	10	20	30	

5 设置仪器最佳测量条件，依次测定工作曲线系列溶液和试样溶液，包括空白和标准物质。

6 同组试样应进行两次空白试验，所用试剂应取自同一试剂瓶。

7 应同时选用与被测样品性质相同或相近的标准物质进行试样验证。每测定 10 个试样溶液，应至少测 1 次标准物质试样溶液。每次进样的清洗时间不应低于 1min。

9.3.5 数据分析和计算应符合下列规定：

1 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 含量应按下式计算：

$$W_1 = (\rho_1 - \rho_0) \times V \times 10^{-6} / m \times 100 \quad (9.3.5)$$

式中： W_1 ——元素百分含量（%）；

ρ_1 ——仪器给出的试样溶液中各成分质量浓度（ $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）；

ρ_0 ——仪器给出的空白溶液中各成分质量浓度（ $\mu\text{g}/\text{mL}$ ）；

V ——试样溶液体积（ mL ）；

m ——试样质量（ g ）。

2 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 含量的计算结果应保留两位小数。海底沉积物主量成分分析的精密密度标准应符合表 9.3.5 的规定。

表 9.3.5 海底沉积物主量成分分析的精密密度标准

成分	水平范围 a (%)	重复性 r (%)	再现性 R (%)
Al_2O_3	11.47~13.86	$r=0.45-0.015m$	$R=1.47-0.075m$
Fe_2O_3	5.96~7.31	$r=0.26-0.0086m$	$R=0.45-0.017m$
MnO	0.38~0.96	$r=0.0020+0.062m$	$R=0.0021+0.11m$
TiO_2	0.52~0.74	$r=0.036+0.0033m$	$R=-0.027+0.20m$
P_2O_5	0.36~1.29	$r=-0.014+0.11m$	$R=0.016+0.13m$
MgO	2.91~3.75	$r=0.059+0.0089m$	$R=0.062+0.047m$
CaO	1.35~5.65	$r=0.072+0.017m$	$R=0.11+0.011m$
Na_2O	4.14~6.44	$r=0.13+0.0053m$	$R=0.33-0.025m$
K_2O	2.30~2.92	$r=0.069+0.0030m$	$R=0.31-0.066m$

II 等 离子质谱法

9.3.6 试验可测定海底沉积物微量元素，主要包括 Ce、Dy、Er、Eu、Gd、Ho、La、Lu、Nd、Pr、Sc、Sm、Tb、Tm、Y、Yb、Bi、Ga、Pb、Sb、Th、Tl、U、Hf、Mo、Nb、Ta、W、Zr、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Ti、V、Zn、Li、Be、Cd、Ba、Rb、Sr、Cs 等，可根据测试需求增加其他元素。

9.3.7 试验所用主要试剂应包括经重蒸处理或者优级纯以上的浓硝酸、浓盐酸、浓氢氟酸及分析纯以上的高氯酸，光谱纯金属、金属氧化物及其盐类配制成的各成分标准储备溶液或市售有证单元素标准溶液，纯度不低于 99.99% 的氩气。

9.3.8 试验所用仪器应主要包括电感耦合等离子体质谱仪；最高温度为 400℃，温度误差小于 ±5℃，表面有聚四氟乙烯涂层保护的自动控温电热板；容积为 20mL，具密封盖和过压保护功能的聚四氟乙烯密闭溶样罐；最小分度值 0.01mg 的天平。

9.3.9 试验操作步骤应符合下列规定：

1 粒度 200 目以下的试样经过充分干燥和混匀，在 110℃ 干燥 5h，置于干燥器中，冷却至室温。

2 称取 0.05g 试样，精确至 0.1mg。

3 用标准储备溶液按表 9.3.9-1 配制五组多元素标准溶液，盛于塑料瓶中。

表 9.3.9-1 多元素标准溶液各元素浓度

组号	元 素	质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$)
1	Ce、Dy、Er、Eu、Gd、Ho、La、Lu、Nd、Pr、Sc、Sm、 Tb、Tm、Y、Yb	100
2	Bi、Ga、Pb、Sb、Th、Tl、U	100
3	Hf、Mo、Nb、Ta、W、Zr	100
4	Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Ti、V、Zn	100
5	Li、Be、Cd、Ba、Rb、Sr、Cs	100

4 用标准储备溶液逐级稀释配制成浓度为 $1\mu\text{g/mL}$ 、体积分数为 2% 的硝酸介质 Rh 内标溶液。

5 用标准储备溶液逐级稀释配制成 Ba、Mn、Ti 浓度为 $10\mu\text{g/mL}$ ，La、Ce、Nd 浓度为 $1\mu\text{g/mL}$ 的含浓度为 $0.04\mu\text{g/mL}$

Rh 的单元标准溶液，介质为体积分数 2% 的硝酸。

6 分别移取按表 9.3.9-1 配制的混标溶液和内标标准溶液，按照表 9.3.9-2 配置五组工作曲线溶液，每组曲线溶液应按照 $0.001\mu\text{g/mL}$ 、 $0.01\mu\text{g/mL}$ 、 $0.1\mu\text{g/mL}$ 以及 $1\mu\text{g/mL}$ 浓度配置，保持体积分数为 2% 的硝酸浓度。

表 9.3.9-2 混合标准溶液各成分的浓度

组号	标准号	混标质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$)	内标质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$)
1	STD1	0.001	0.01
	STD2	0.01	0.01
	STD3	0.1	0.01
	STD4	1	0.01
2	STD1	0.001	0.01
	STD2	0.01	0.01
	STD3	0.1	0.01
	STD4	1	0.01
3	STD1	0.001	0.01
	STD2	0.01	0.01
	STD3	0.1	0.01
	STD4	1	0.01
4	STD1	0.001	0.01
	STD2	0.01	0.01
	STD3	0.1	0.01
	STD4	1	0.01
5	STD1	0.001	0.01
	STD2	0.01	0.01
	STD3	0.1	0.01
	STD4	1	0.01
空白溶液	Blank	0	0.01

7 将试样置于聚四氟乙烯密闭溶样罐中，加 1mL 硝酸，3mL 氢氟酸，摇匀并加盖密闭，于自动控温电热板上 160℃～180℃分解 48h，取下冷却后开启密闭盖，蒸至近干，加 1mL 高氯酸，蒸至白烟冒尽。冷却后加 2mL 盐酸，于自动控温电热板上加热使盐类溶解，蒸至近干，加 2mL 重蒸硝酸，蒸至近干，除去氯离子。加 1.5mL 硝酸，加盖旋紧密闭，于自动控温电热板上 160℃～180℃加热溶解 12h。冷却后开启密闭盖，加入 0.5mLRh 内标溶液，加盖摇匀，于自动控温电热板上 80℃保温 12h，冷却至室温后开启密闭盖，用 2%硝酸移至 50mL 容量瓶中，并用其稀释至刻度后摇匀备测。

8 设置仪器最佳测量条件，依次测定工作曲线 1～工作曲线 5。每次进样的清洗时间应不低于 2min。在相同条件下，测定试样溶液，包括空白和标准物质，每次进样的清洗时间不应低于 5min。每测定 10 个试样溶液，应至少测 1 次标准物质试样溶液。

9 同组试样进行两次空白试验，所用试剂应取自同一试剂瓶。

10 应同时选用与被测样品性质相同或相近的标准物质进行试样验证。

11 试样测定完毕，进行干扰系数的测定，将干扰校正用单元素标准溶液视为试样溶液，测定各元素的浓度。

9.3.10 数据分析和计算应符合下列规定：

1 微量元素含量应以质量分数计，按下列公式计算：

$$W_i = (\rho_i - \rho_0) \times V / m \quad (9.3.10-1)$$

$$\rho_i = \rho_{mi} - \alpha_{(i/j)} \times \rho_{mj} \quad (9.3.10-2)$$

式中： W_i ——微量元素含量 ($\mu\text{g/g}$)

ρ_i ——经干扰校正后试样溶液中各元素 (i) 质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$)；

ρ_{mi} ——未经干扰校正后试样溶液中各元素 (i) 质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$);

ρ_{mj} ——试样溶液中干扰元素 (j) 质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$);

$\alpha_{(i/j)}$ ——干扰元素 j 对被测元素 i 的干扰系数;

ρ_0 ——空白溶液中各元素质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$);

V ——试样溶液体积 (mL);

m ——试样质量 (g)。

2 计算结果小于 $100\mu\text{g/g}$, 应保留三位有效数字; 大于或等于 $100\mu\text{g/g}$, 应保留整数位。

9.4 氧化还原电位测定

9.4.1 氧化还原电位宜采用电位计法测定, 可用于现场测定沉积物氧化还原电位。

9.4.2 试验仪器设备应主要包括电位仪、铂丝电极、自带盐桥与陶瓷套的饱和甘汞电极、容量 100mL 和 250mL 的烧杯、容量 100mL 的量瓶。

9.4.3 试验缓冲溶液配制应符合下列规定:

1 取适量邻苯二甲酸氢钾 ($\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$) 在 115°C 干燥 2h~3h 并于干燥器中冷却至室温, 称取 1.012g 置于 100mL 烧杯中, 加水溶解。

2 全量转入 100mL 量瓶中, 加水至标线。

3 加入少量醌氢醌 ($\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{O}_4$), 使其饱和。

4 贮存于聚乙烯瓶中。

9.4.4 氧化还原电位测定应符合下列规定:

1 电极检查和校正可按下列步骤进行:

1) 以铂电极为指示电极, 连接仪器的“+”极, 以饱和甘汞电极为参比电极, 连接仪器的“-”极。

2) 接好电路, 将两极浸入 pH 值为 4.01 用醌氢醌饱和的缓冲溶液中, 开启电源, 测定饱和甘汞电极电位。

3) 检查是否与 25℃ 时的理论值 221mV 相符, 当测定值与理论值之差超过 5mV, 应更换铂电极。

2 样品测定可按下列步骤进行:

1) 可在采泥器中直接测定; 也可取刚采集的沉积物样品迅速装入 100mL 烧杯中, 装入量约半杯, 样品力求保持原状, 避免空气进入。

2) 将已固定好的铂电极和饱和甘汞电极插入样品, 深度约 3cm, 电极间距 3cm~5cm。

3) 开启电源, 按下读数开关, 待电位平衡后读数。

4) 改变电极位置, 重复测定三次, 取平均值。

9.4.5 沉积物的氧化还原电位应按下列式计算:

$$E = E_a + E_b \quad (9.4.5)$$

式中: E ——沉积物的氧化还原电位值 (mV);

E_a ——饱和甘汞电极电位 (mV), 在 25℃ 时取 243mV;

E_b ——仪器上测得的电位值 (mV)。

9.5 腐蚀电流密度测定

9.5.1 腐蚀电流密度宜采用线性极化法测定。

9.5.2 试验仪器设备应主要包括便携式土壤腐蚀速率测量仪、土壤钻、自带参比电极与腐蚀试片的阴极保护多功能探头。

9.5.3 埋入待测土壤前, 应采用膨润土将阴极保护多功能测量探头上的永久性固体参比电极的微孔瓷片的凹形空间填满。

9.5.4 自然状态下土壤腐蚀电流密度的试验步骤应符合下列规定:

1 在距阴极保护多功能测量探头 2m~9m 处钻入土壤钻。

2 将土壤钻、探头接线盒内的参比电极、辅助电极 2 分别接入便携式土壤腐蚀测量仪的“辅助”、“参比”和“工作”接线端 (图 9.5.4)。

3 调节便携式土壤腐蚀测量仪的平衡电阻, 使检流计不发

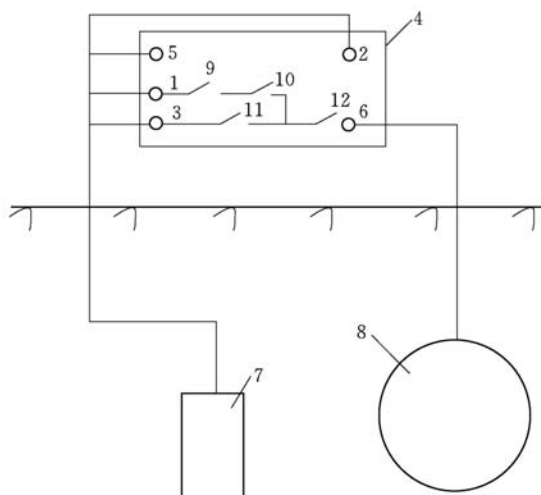


图 9.5.4 阴极保护多功能探头埋地接线图

1—辅助电极 1；2—辅助电极 2；3—辅助电极 3；4—探头接线盒；

5—永久性固体参比电极；6—与钢结构连接端；7—探头；

8—钢结构；9、10、11、12—开关

生偏转。

4 向辅助电极 2 施加极化电流，使之极化 10mV 左右。

9.5.5 自然状态下的腐蚀电流密度可按下式计算：

$$I_{\text{corr}} = 1.09 \frac{\Delta I}{\Delta E} \quad (9.5.5)$$

式中： I_{corr} ——腐蚀电流密度 (A/cm^2)；

ΔI ——极化电流 (mA)；

ΔE ——极化值 (mV)。

9.6 有机质试验

I 烧失量法

9.6.1 烧失量法可用于除有机质外受热不挥发的土。

9.6.2 试验主要仪器设备应符合下列规定：

- 1 高温炉，自动控制温度达 1300℃。
- 2 天平量程 100g，最小分度值 0.0001g。
- 3 瓷坩埚、干燥器、坩埚钳。

9.6.3 试验操作步骤应符合下列规定：

1 将空坩埚放入已升温至 550℃ 的高温炉中灼烧至恒重，连续两次称量之差不大于 1mg。

2 将试样放入烘箱，在温度 100℃～105℃ 下烘干至恒重，称取通过 1mm 筛孔的烘干土 2g，精确至 0.1mg，放入已烧至恒量的坩埚中，把坩埚放入未升温的高温炉内，斜盖上坩埚盖。徐徐升温至 550℃，并保持恒温 5h，取出稍加冷却，盖上坩埚盖。放入干燥器内，冷却 0.5h 后称量。重复灼烧称量，至前后两次质量相差小于 0.5mg。

3 至少应进行一次平行试验。

9.6.4 烧失量应按下式计算：

$$w_u = \frac{m - (m_2 - m_1)}{m} \times 100 \quad (9.6.4)$$

式中： w_u ——烧失量（%）；

m ——烘干土样质量（g）；

m_1 ——空坩埚质量（g）；

m_2 ——灼烧后土样和坩埚质量（g）。

9.6.5 烧失量法测定结果允许偏差应符合表 9.6.5 的规定。

表 9.6.5 烧失量法测定结果允许偏差

测定值（%）	绝对偏差（%）	相对偏差（%）
>50	<0.9	1.0～1.5
50～30	<0.7	1.2～2.0
30～10	<0.5	2.0～3.0
10～5	<0.3	3.0～4.0

续表 9.6.5

测定值 (%)	绝对偏差 (%)	相对偏差 (%)
5~1	<0.2	4.0~5.0
1~0.1	<0.05	5.0~6.0
0.1~0.05	<0.006	6.0~8.0
0.05~0.01	<0.004	8.0~10.0
0.01~0.005	<0.001	10.0~12.0
0.005~0.001	<0.0006	12.0~15.0
<0.001	<0.00015	15.0~20.0

9.6.6 烧失量法有机质试验的记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.26 的格式采用。

II 重铬酸钾容量法

9.6.7 重铬酸钾容量法可用于有机质含量不大于 150g/kg 的土。

9.6.8 采用重铬酸钾容量法测定土中的有机碳，应乘以经验系数 1.724 换算成有机质，并应以 1kg 烘干土中所含有机质的质量 (g) 表示，单位为 g/kg。

9.6.9 试验主要仪器设备应符合下列规定：

- 1 分析天平量程 200g，最小分度值 0.0001g。
- 2 油浴锅内盛甘油或植物油并应带铁丝笼。
- 3 温度计量程 0℃~200℃，分度值为 0.5℃。
- 4 酸式滴定管、三角瓶、硬质试管、小漏斗、试管夹。

9.6.10 试验所用试剂应符合下列规定：

1 配制浓度为 0.4mol/L 的化学纯重铬酸钾 ($\frac{1}{6}K_2Cr_2O_7$)—硫酸溶液。用分析天平称取经 105℃~110℃烘干并研磨细的基准重铬酸钾 39.2245g，溶于 600mL~800mL 纯水中，也可加热溶解，冷却后加水至 1L，将此溶液转移入 3L 大烧杯中。另取 1L

密度为 $1.84\text{g}/\text{cm}^3$ 的浓硫酸，缓慢地倒入重铬酸钾水溶液中，不断搅动。

2 配制浓度为 $0.1000\text{mol}/\text{L}$ 的重铬酸钾 ($\frac{1}{6}\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 标准溶液。称取 130°C 烘 $2\text{h}\sim 3\text{h}$ 的优级纯重铬酸钾 4.904g ，先用少量水溶解，然后移入 1000mL 容量瓶中，加水定容。

3 配制邻菲罗啉指示剂。将邻菲罗啉 1.485g 和硫酸亚铁 0.695g 溶于 100mL 纯水，贮于棕色瓶中。

4 配制浓度为 $0.1\text{mol}/\text{L}$ 的硫酸亚铁或硫酸亚铁铵标准溶液步骤应符合下列规定：

- 1) 称取 28.0g 硫酸亚铁 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 或 40.0g 硫酸亚铁铵，溶于纯水中，加入浓硫酸 20mL 搅拌均匀，稀释至 1000mL ，贮于棕色瓶中。
- 2) 标定浓度为 $0.1\text{mol}/\text{L}$ 的硫酸亚铁或硫酸亚铁铵标准溶液。吸取 $0.1000\text{mol}/\text{L}$ 重铬酸钾标准溶液 20.00mL 放入 150mL 三角瓶中，加浓硫酸 $3\text{mL}\sim 5\text{mL}$ 和邻菲罗啉指示剂 3 滴，用硫酸亚铁溶液滴定，根据硫酸亚铁溶液消耗量算出硫酸亚铁溶液的准确浓度。
- 3) 硫酸亚铁的浓度可按下式计算，计算结果应精确到小数点后四位，取三个平行试验的算术平均值。

$$c(\text{FeSO}_4) = \frac{c\left(\frac{1}{6}\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\right) \times V(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)}{V(\text{FeSO}_4)} \quad (9.6.10)$$

式中： $c(\text{FeSO}_4)$ ——硫酸亚铁标准溶液的浓度 (mol/L)；

$V(\text{FeSO}_4)$ ——硫酸亚铁标准溶液的体积 (mL)；

$c\left(\frac{1}{6}\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\right)$ ——重铬酸钾标准溶液的浓度 (mol/L)；

$V(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)$ ——重铬酸钾标准溶液的体积 (mL)。

5 密度为 $1.84\text{g}/\text{cm}^3$ 的硫酸。

9.6.11 试验操作步骤应符合下列规定：

1 当试样中含有机质小于 8mg 时，可用分析天平称取剔除植物根并通过 0.15mm 筛的风干试样 $0.1\text{g}\sim 0.5\text{g}$ ，放入干燥的试管底部，吸取重铬酸钾-硫酸溶液 10mL ，加入试管并摇匀，在试管口放上小玻璃漏斗。

2 将试管插入铁丝笼中，放入 190°C 左右的油浴锅内。试管内的液面应低于油面。温度应控制在 $170^\circ\text{C}\sim 180^\circ\text{C}$ ，从试管内试液沸腾时开始计时，煮沸 5min ，取出。

3 将试管内溶液倒入三角瓶中，用纯水洗净试管内部，并使溶液控制在 60mL 左右，加入邻啡罗啉指示剂 3 滴 \sim 5 滴，用硫酸亚铁标准溶液滴定，当溶液由黄色经绿色突变至橙红色时为止。记下硫酸亚铁标准溶液用量，准确至 0.01mL 。

4 试验的同时，应进行 2 个空白试验，取 0.2g 石英砂代替土样。

9.6.12 有机质含量应按下式计算，应计算至 $0.1\text{g}/\text{kg}$ ，试验结果取算术平均值。

$$\text{O. M.} = \frac{c \times (V_0 - V) \times 0.003 \times 1.724}{m} \times 1000 \quad (9.6.12)$$

式中：O. M.——土壤有机质含量 (g/kg)；

c ——硫酸亚铁标准溶液的浓度 (mol/L)；

V_0 ——空白试验时消耗硫酸亚铁标准滴定溶液的体积 (mL)；

V ——试验测定消耗硫酸亚铁标准滴定溶液的体积 (mL)；

m ——干土质量 (g)；

0.003 —— $1/4$ 碳原子的毫摩尔质量 (kg/mmol)；

1.724 ——有机碳换算成有机质的系数。

9.6.13 有机质测定结果允许偏差应符合表 9.6.13 的规定。

表 9.6.13 有机质测定结果允许偏差

测定值 (g/kg)	绝对偏差 (g/kg)
>100	>5
100~70	5~3.5
70~40	3.5~2.0
40~10	2.0~0.5
<10	<0.5

9.6.14 重铬酸钾容量法试验记录可采用本规程附录 C 中表 C.0.27 的格式。

10 黏土矿物分析

10.1 X射线衍射分析

10.1.1 X射线衍射分析可用于测定海底沉积物黏土矿物的种类和相对含量。

10.1.2 X射线衍射分析试验方法应符合国家现行行业标准《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》SY/T 5163的有关规定。

10.2 差热分析

10.2.1 差热分析可用于鉴定黏土矿物的种类。

10.2.2 试验仪器和试剂应主要包括差热分析仪、低温干燥箱、磁力搅拌器、pH计、分析纯标准以上的盐酸、蒸馏水、氧化铝、玛瑙研钵和所需的玻璃器皿。

10.2.3 试验样品处理应符合下列规定：

1 样品应放入电热干燥箱中，在低于60℃的温度下烘干，冷却至室温后待用。

2 将干燥后的样品放在玛瑙研钵中研磨至全部粒径小于40μm。

3 用1%稀盐酸浸泡48h后，用蒸馏水稀释至溶液呈中性，将样品充分搅拌，静置15min后将悬浮液取出，反复多次直至悬浮液基本澄清为止，将取得的悬浮液在50℃~60℃下烘干待用。

10.2.4 试验样品测试应根据仪器要求称取相应量的样品与参比物氧化铝，将样品和参比物分别放入样品杯和参照杯中，将温度从20℃升至1100℃，升温速率宜为10℃/min，记录差热曲线。

10.2.5 黏土矿物鉴定应符合下列规定：

1 差热曲线在 $400^{\circ}\text{C} \sim 700^{\circ}\text{C}$ 之间存在吸热谷， $950^{\circ}\text{C} \sim 1050^{\circ}\text{C}$ 之间存在快速强烈的放热峰时，可鉴定为高岭石。

2 差热曲线在 $100^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 之间存在吸热谷， $650^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 之间存在吸热谷时，可鉴定为蒙脱石。

3 差热曲线在 $100^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 之间存在吸热谷， $550^{\circ}\text{C} \sim 650^{\circ}\text{C}$ 之间存在宽缓的吸热谷时，可鉴定为伊利石。

10.3 扫描电镜分析

10.3.1 扫描电镜分析试验可用于鉴定海底沉积物各黏土矿物种类和形态特征。

10.3.2 试验所用主要设备和材料应符合下列要求：

1 主要设备应包括带能谱仪的扫描电子显微镜、真空喷金镀膜仪、真空冷冻干燥器、干燥器。

2 主要材料应包括镀膜专用金粉、导电胶、双面胶带。

10.3.3 试验试样制备步骤应符合下列要求：

1 用真空冷冻干燥器将沉积物样品冻干备用。

2 按照仪器载物台的尺寸要求，选取适应载物台尺寸的试样。

3 用导电胶将试样粘在载物台上，分析面与载物台上表面应保持平行。

4 利用真空镀膜仪对试样进行喷金镀膜处理。

10.3.4 试验仪器的分析条件宜符合下列规定：

1 加速电压宜为 20kV 或 15kV 。

2 根据黏土矿物的形态特征，扫描电镜的放大倍数宜为 300 倍 \sim 10000 倍。

3 进行能谱分析，样品电流宜为 $1.0\text{nA} \sim 1.5\text{nA}$ ，且每秒电子计数应达到 2000 次以上；采集时间宜为 50s 或 100s；电子束斑直径宜为 $1\mu\text{m}$ ，对含 K、Na 可迁移电子的矿物，电子束斑

可适当放大。

10.3.5 扫描电镜分析应符合下列规定：

1 扫描电子显微镜观察前，应确定待分析黏土矿物晶体的位置，宜选择平坦的聚合体。

2 在 300 倍～500 倍放大倍数下观察黏土矿物的赋存特征并照相。

3 在 500 倍～10000 倍放大倍数下观察黏土矿物集合体形态特征或单个晶体特征并照相。

4 能谱分析应包括下列内容：

1) 采集试样 X 射线能谱图。

2) 选择激发效率最高、无干扰的谱线作为各元素能谱的分析线。

3) 鉴别各元素的谱峰。

4) 确定成分分析元素清单。

5) 选用所分析元素的标样数据库。

6) 扣除背景。

7) 用峰面积校正计算，得到黏土矿物成分数据。

5 扫描电镜法黏土矿物鉴定标准宜符合附录 E 的规定。

11 海底浅层气及含气土试验

11.1 海底浅层气测试

I 浅层气原位采集及测试

11.1.1 试验可用于海底浅层沉积物原位温度测定和孔隙气体压力测定，以及沉积物孔隙水和孔隙气的样品采集。

11.1.2 试验设备应主要包括海底原位探测器及样品采集系统（图 11.1.2）和船载辅助电控与采集设备。

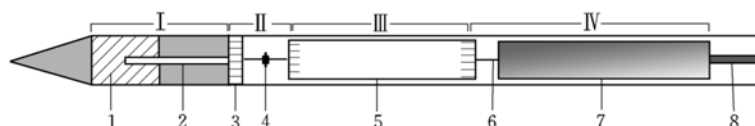


图 11.1.2 海底原位探测及样品采集系统示意图

I—过滤器；II—气密通道；III—采集容器；IV—检测器

1—过滤膜；2—样品传输管；3—橡胶或者硅胶隔膜；4—双头采样针；

5—真空管；6—传感器采样针；7—压力及温度传感器；8—传输电缆

11.1.3 试验操作步骤应符合下列规定：

1 操作前应校准压力及温度传感器。

2 将海底原位探测器及样品采集系统安装在钻杆顶部，将过滤器推进至钻孔底部之下未被扰动的土壤中，速度宜为 $1\text{cm/s} \sim 2\text{cm/s}$ ，推进至目标位置后，停止推进并打开采集容器与过滤器之间的气密通道，在船载辅助设备中记录采集容器中的压力及温度随时间的变化。

3 操作持续时间应足够长，以取得至少 15mL 原位孔隙水或孔隙气，黏性土中宜取样 $60\text{min} \sim 180\text{min}$ ，砂土中宜取样

5min~20min。

4 回收原位探测及样品采集系统到甲板，拆卸探头，对采集容器中收集的孔隙水和气体取样。

11.1.4 温度和压力的原位测试报告宜包括试验面积、原位取样站位数量、试验次数、传感器序号；试验位置的坐标、水深；传感器记录的温度和压力。

II 气体组分气相色谱法测定

11.1.5 气相色谱法可用于测定气体中有机烃类和二氧化碳、硫化氢等气体的含量。

11.1.6 试验设备宜采用气相色谱仪，气相色谱仪应符合下列规定：

1 检测器可用热导检测器，对于正丁烷摩尔分数为 1% 的气样，进样 0.25mL，产生信号不应低于 0.5mV。

2 色谱柱应使用对气样组分呈惰性和无吸附性的材料制成。

3 色谱柱内填充物应能完全分离氧、氮和甲烷，分离度 R 不应低于 1.5，分离度应按下式计算：

$$R = 2(t_2 - t_1) / (W_2 + W_1) \quad (11.1.6)$$

式中： t_1 ——相邻的两个峰中，第 1 个色谱峰的绝对保留时间 (s)；

t_2 ——第 2 个色谱峰的绝对保留时间 (s)；

W_1 ——第 1 个色谱峰的峰宽 (s)；

W_2 ——相邻的第 2 个色谱峰的峰宽 (s)。

11.1.7 仪器校正应符合下列规定：

1 恒温操作时，柱温保持恒定，其变化应在 0.3℃ 以内。

2 在分析的全过程中，载气流量应保持恒定。

3 对于摩尔分数大于 5% 的任何组分，应获取其线性数据。

4 仪器宜每天进行校正操作。两次或两次以上连续进标准气检查，每个组分相应值相差不应大于 1%。

11.1.8 试验材料应包含纯度不低于 99.99% 的氦气、氢气、氮

气或氩气。分析所需的标准气可采用国家二级标准物质，或按现行国家标准《气体分析 校准用混合气体的制备 称量法》GB/T 5274 制备。

11.1.9 试验操作应符合下列规定：

1 样品宜在比取样时气源温度高 $10^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ 的温度下达到平衡。当气源温度高于实验室温度时，气样在进入色谱仪之前应预先加热；当已知气样的烃露点低于环境最低温度时，可不加热。

2 进样量不应超过 0.5mL ，对于浅层气样品，可用气体注射器或气体进样阀直接进样。

3 样品瓶和仪器连接的管路应选用对气样组分呈惰性且无吸附性的材料制成，不应选用塑料或铜制品。

4 使用氦气或氢气作载气时，应根据实际样品情况选择合适的进样量进样，并在适当时机反吹重组分。按同样方法获得标准气相应的响应。当色谱柱能分离甲烷与氮、氧时，也可测定甲烷，但进样量不应超过 0.5mL 。

11.1.10 数据处理与成果整理应符合下列规定：

1 气样中任何组分浓度的有效数字位数，不应多于标准气中相应组分浓度的有效数字位数。

2 对于戊烷或分子量小于戊烷的气体组分，宜用外标法计算气体组分的浓度，每个组分归一的摩尔分数应为每个组分的原始含量值乘以 100 除以所有组分原始含量值的总和。所有组分原始含量值的总和与 100.0% 的差值不应超过 1.0% 。外标法测量每个组分的峰高或峰面积，气样中 i 组分的浓度 y_i 可按下式计算：

$$y_i = y_{si} \times (H_i / H_{si}) \times (p_b / p_a) \quad (11.1.10)$$

式中： y_{si} ——标准气中 i 组分的摩尔分数（%）；

H_i ——气样中 i 组分的峰高或峰面积；

H_{si} ——标准气中 i 组分的峰高或峰面积， H_i 和 H_{si} 的单位应相同；

p_b ——空气进样时的绝对压力 (kPa)；

p_a ——空气进样时实际的大气压力 (kPa)。

11.2 海底含气土力学性质试验

11.2.1 海底含气土试验可用于粒径不大于 5mm 的海底含气砂土。

11.2.2 土样的制备应采用具有体变量测内压力室的应力路径三轴仪和溶气仪。

11.2.3 含气土试验步骤应符合下列规定：

1 试样制备应符合本规程第 4.2.11 条的规定。

2 试样饱和宜在压力室内先进行水头饱和，再通过反压饱和和法提高饱和度，直至试样达到饱和，反压饱和法应符合本规程第 4.3.6 条的规定。维持当前有效应力不变，同步提高反压和围压，直到试样反压与溶气仪反应釜内的预设压力值相等，并维持此时压力作用不少于 3h。

3 将溶气仪的接头端与应力路径三轴仪的反压系统管路连成回路，利用两个溶气反应釜之间的势差使溶气水流经反压阀，自下而上缓慢驱替饱和试样中的无气水，驱替时间不宜少于 2h，且驱替用水量不宜少于试样体积的 3 倍。关闭三轴仪反压阀，断开溶气仪与应力路径三轴仪的管路连接。

4 对饱和试样中的溶气水进行脱溶。利用应力路径三轴仪的压力体积控制器，同步降低试样的围压和反压，每级递减量不宜超过 50kPa，使溶解在试样孔隙水中的二氧化碳逐级脱溶，孔隙水压力回升，直至孔隙水压力连续 15min 变化量小于 5kPa，可认为本级脱溶稳定，开始下一级脱溶。在脱溶过程中，通过应力路径三轴仪的体变量测内压力室测量试样的总体积变化。每级脱溶后的含气试样饱和度和孔隙比可按下列公式计算：

$$S_{ri} = S_{r0} - \frac{S_{r0}}{n_0} \times \frac{\Delta V_T}{V_T} \quad (11.2.3-1)$$

$$e_i = e_0 + (1 + e_0) \times \frac{\Delta V_T}{V_T} \quad (11.2.3-2)$$

式中： S_{ri} ——当前饱和度；

S_{r0} ——初始饱和度，可取 1；

n_0 ——初始孔隙率，卸荷脱溶前饱和试样的孔隙率；

ΔV_T ——卸荷脱溶稳定的试样体积变化量 (mm^3)；

V_T ——卸荷脱溶前饱和试样的总体积 (mm^3)；

e_i ——当前孔隙比；

e_0 ——初始孔隙比，卸荷脱溶前饱和试样的孔隙比。

5 最后一级脱溶稳定后，打开反压阀；将反压值恢复至与当前孔隙水压力值相等，保持反压不变，增加围压，恢复有效围压至目标值，试样排水稳定后关闭反压阀。当采用等向固结时，固结稳定标准可采用关闭排水阀后 5min 内孔隙水压力变化不大于 5kPa；当采用不等向固结时，固结稳定标准可采用 5min 内轴向变形不大于 0.005mm。

11.2.4 三轴压缩试验的不固结不排水剪试验应按本规程第 6.6.4 条和第 6.6.5 条执行；固结不排水剪试验应按本规程第 6.6.8 条和第 6.6.9 条执行。

11.2.5 动三轴试验可按本规程第 6.10.5～6.10.11 条执行。

11.2.6 共振柱试验可按本规程第 6.12.6～6.12.9 条执行。

12 岩石物理力学性质试验

12.1 含水率试验

12.1.1 岩石含水率试验应采用烘干法。

12.1.2 烘干法试验方法应符合现行国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 的有关规定。

12.2 吸水性试验

12.2.1 岩石吸水性试验可用于遇水不崩解、不溶解和不开缩膨胀的岩石，应包括岩石吸水率试验和岩石饱和吸水率试验，并应符合下列要求：

1 岩石吸水率应采用自由浸水法测定。

2 岩石饱和吸水率应采用煮沸法或真空抽气法强制饱和后测定。岩石饱和吸水率应在岩石吸水率测定后进行。

3 在测定岩石吸水率与饱和吸水率的同时，宜采用水中称量法测定岩石块体干密度和岩石颗粒密度。

12.2.2 岩石吸水性试验方法应符合现行国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 的有关规定。

12.3 颗粒密度试验

12.3.1 岩石颗粒密度试验应采用比重瓶法或水中称量法。

12.3.2 岩石颗粒密度试验方法应符合现行国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 的相关规定。

12.4 块体密度试验

12.4.1 岩石块体密度试验应采用量积法、水中称量法或蜡封

法，并应符合下列要求：

1 凡能制备成规则试件的各类岩石，宜采用量积法。

2 除遇水崩解、溶解和干缩湿胀的岩石外，均可采用水中称量法。

3 不能用量积法或水中称量法测定的岩石，宜采用蜡封法。

12.4.2 岩石块体密度试验应符合现行国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 的相关规定。

12.5 膨胀性试验

12.5.1 岩石膨胀性试验应包括岩石自由膨胀率试验、岩石侧向约束膨胀率试验和岩石体积不变条件下的膨胀压力试验，并应符合下列要求：

1 遇水不易崩解的岩石可采用岩石自由膨胀率试验，遇水易崩解的岩石不应采用岩石自由膨胀率试验。

2 各类岩石均可采用岩石侧向约束膨胀率试验和岩石体积不变条件下的膨胀压力试验。

12.5.2 试样应在现场采取，并保持天然含水状态，不应采用爆破法取样。

12.5.3 岩石膨胀性试验方法应符合现行国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 的相关规定。

12.6 单轴抗压强度试验

12.6.1 岩石单轴抗压强度试验可用于能制成圆柱体试件的各类岩石。

12.6.2 试验仪器设备应主要包括钻石机、切石机、磨石机、车床测量平台和材料试验机。

12.6.3 同一状态和同一加载方向下，每组试验试件的数量应为3个。

12.6.4 试验操作步骤应符合下列规定：

1 应将试件置于试验机承压板中心，调整球形座，使试件两端面与试验机上下压板接触均匀。

2 应以每秒 0.5MPa~1.0MPa 的速度加载直至试件破坏，软岩的加载速度可适当降低，并记录破坏载荷及加载过程中的现象。

3 试验结束后，应描述试件的破坏形态。

12.6.5 试验成果整理应符合下列规定：

1 岩石单轴抗压强度和软化系数应分别按下列公式计算：

$$R = \frac{P}{A} \quad (12.6.5-1)$$

$$\eta = \frac{\bar{R}_w}{\bar{R}_d} \quad (12.6.5-2)$$

式中：R——岩石单轴抗压强度（MPa）；

η ——软化系数；

P——破坏载荷（N）；

A——试件截面积（mm²）；

\bar{R}_w ——岩石饱和单轴抗压强度平均值（MPa）；

\bar{R}_d ——岩石烘干单轴抗压强度平均值（MPa）。

2 计算值应取 3 位有效数字，岩石软化系数计算值应精确至 0.01。

12.6.6 试验记录应主要包括工程名称、取样位置、试件编号、试件描述、含水状态、受力方向、试件尺寸和破坏载荷。

12.7 单轴压缩变形试验

12.7.1 岩石单轴压缩变形试验可用于能制成圆柱体试件的各类岩石，可采用电阻应变片法或千分表法。

12.7.2 试验主要仪器设备除应包含本规程第 12.6.2 条规定的仪器设备外，采用电阻应变片法时还应包括静态电阻应变仪、惠斯顿电桥、兆欧表、万用电表和电阻应变片；采用千分表法时还

应包括千分表、千分表架和磁性表架。

12.7.3 电阻应变片法试验步骤应符合下列规定：

1 应变片阻栅长度应大于岩石最大矿物颗粒直径的 10 倍，并应小于试件半径；同一试件所选定的工作片与补偿片的规格、灵敏系数等应相同。电阻值允许偏差应为 0.2Ω 。

2 贴片位置应选择试件中部相互垂直的两对称部位，应以相对面为一组，分别粘贴轴向、径向应变片，并应避免开裂隙或斑晶。

3 贴片位置应打磨平整光滑，并用清洗液清洗干净。应在贴片位置的表面均匀地涂一层防潮胶液，厚度不宜大于 0.1mm ，范围应大于应变片。

4 应变片应牢固地粘贴在试件上，轴向或径向应变片的数量可采用 2 片或 4 片，其绝缘电阻值不应小于 $200\text{M}\Omega$ 。

5 在焊接导线后，可在应变片上作防潮处理。

6 应将试件置于试验机承压板中心，调整球形座，使试件受力均匀，并测初始读数。

7 加载宜采用一次连续加载法。应以每秒 $0.5\text{MPa} \sim 1.0\text{MPa}$ 的速度加载，逐级测读载荷与各应变片应变值，直至试件破坏，记录破坏载荷。测值不宜少于 10 组。

8 应记录加载过程及破坏时的现象，并对破坏后的试件进行描述。

12.7.4 千分表法试验步骤应符合下列规定：

1 千分表架应固定在试件预定的标距上，在表架上的对称部位应分别安装量测试件轴向或径向变形的测表。标距长度和试件直径应大于岩石最大矿物颗粒直径的 10 倍。

2 对于变形较大的试件，可将试件置于试验机承压板中心，应将磁性表架对称安装在下承压板上，量测试件轴向变形的测表表头应对称，应直接与上承压板接触。量测试件径向变形的测表表头应直接与试件中部表面接触，径向测表应分别安装在试件直

径方向的对称位置上。

3 量测轴向或径向变形的测表可采用 2 只或 4 只。

4 其他试验步骤应按照本规程第 12.7.3 条中第 6~8 款的要求进行。

12.7.5 试验成果整理应符合下列规定：

1 单轴抗压强度应按本规程公式 (12.6.5-1) 计算。

2 各级应力应按下式计算：

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (12.7.5-1)$$

式中： σ ——各级应力 (MPa)；

P ——与所测各组应变值相应的载荷 (N)。

A ——试件的横截面积 (mm^2)。

3 千分表法各级应力的轴向应变值和对应的径向应变值应分别按下列公式计算：

$$\epsilon_l = \frac{\Delta L}{L} \quad (12.7.5-2)$$

$$\epsilon_d = \frac{\Delta D}{D} \quad (12.7.5-3)$$

式中： ϵ_l ——轴向应变值；

ϵ_d ——径向应变值；

ΔL ——轴向变形平均值 (mm)；

ΔD ——径向变形平均值 (mm)；

L ——轴向测量标距或试件高度 (mm)；

D ——试件直径 (mm)。

4 应绘制应力与轴向应变及径向应变关系曲线。

5 岩石平均弹性模量和平均泊松比应分别按下列公式计算：

$$E_{av} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_{lb} - \epsilon_{la}} \quad (12.7.5-4)$$

$$\mu_{av} = \frac{\epsilon_{db} - \epsilon_{da}}{\epsilon_{lb} - \epsilon_{la}} \quad (12.7.5-5)$$

式中： E_{av} ——岩石平均弹性模量（MPa）；

μ_{av} ——岩石平均泊松比；

σ_a ——应力与轴向应变关系曲线上直线段始点的应力值（MPa）；

σ_b ——应力与轴向应变关系曲线上直线段终点的应力值（MPa）；

ϵ_{1a} ——应力为 σ_a 时的轴向应变值；

ϵ_{1b} ——应力为 σ_b 时的轴向应变值；

ϵ_{da} ——应力为 σ_a 时的径向应变值；

ϵ_{db} ——应力为 σ_b 时的径向应变值。

6 岩石割线弹性模量及相应的泊松比应分别按下列公式计算：

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\epsilon_{150}} \quad (12.7.5-6)$$

$$\mu_{50} = \frac{\epsilon_{d50}}{\epsilon_{150}} \quad (12.7.5-7)$$

式中： E_{50} ——岩石割线弹性模量（MPa）；

μ_{50} ——岩石泊松比；

σ_{50} ——相当于岩石单轴抗压强度 50% 时的应力值（MPa）；

ϵ_{150} ——应力为 σ_{50} 时的轴向应变值；

ϵ_{d50} ——应力为 σ_{50} 时的径向应变值。

7 岩石弹性模量值应取 3 位有效数字，岩石泊松比计算值应精确至 0.01。

12.7.6 试验记录应主要包括工程名称、取样位置、试件编号、试件描述、含水状态、受力方向、试件尺寸和破坏载荷。

12.8 直剪试验

12.8.1 直剪试验应采用平推法，可用于测定各类岩石、岩石结

构面以及混凝土与岩石接触面的抗剪强度参数。

12.8.2 直剪试验应主要包括下列仪器设备：

- 1 试件制备设备。
- 2 试件饱和与养护设备。
- 3 应力控制式平推法直剪试验仪。
- 4 位移测表。

12.8.3 每组试验试件的数量不应少于 5 个。

12.8.4 试件安装应符合下列规定：

1 应将试件置于直剪仪的剪切盒内，试件受剪方向宜与预定受力方向一致，试件与剪切盒内壁的间隙应用填料填实，应使试件与剪切盒成为整体。预定剪切面应位于剪切缝中部。

2 安装试件时，法向载荷和剪切载荷的方向应通过预定剪切面的几何中心。法向位移测表和剪切位移测表应对称布置，各测表数量不应少于 2 只。

3 预留剪切缝宽度应为试件剪切方向长度的 5%，或为结构面充填物的厚度。

4 混凝土与岩石接触面抗剪强度试验的试件，混凝土强度应达到预定强度等级。

12.8.5 法向荷载施加应符合下列规定：

1 在每个试件上分别施加不同的法向荷载，对应的最大法向应力值不宜小于预定的法向应力。各试件的法向荷载宜根据最大法向荷载等分确定。

2 在施加法向荷载前，应测读各法向位移测表的初始值。应每 10min 测读一次，各个测表三次读数差值不超过 0.02mm 时，可施加法向荷载。

3 对于岩石结构面中含有充填物的试件，最大法向荷载应以不挤出充填物为宜。

4 对于不需固结的试件，法向荷载可一次施加完毕；法向荷载施加完毕时应测读法向位移，5min 后应再测读一次，即可

施加剪切荷载。

5 对于需固结的软弱结构面试件，应按充填物的性质和厚度分 1 级~3 级施加。在法向荷载施加至预定值后的第一小时内，应每隔 15min 读数一次；然后每 30min 读数一次。当各个测表每小时法向位移不超过 0.05mm 时，可认为固结稳定，即可施加剪切荷载。

6 在剪切过程中，应使法向荷载始终保持恒定。

12.8.6 剪切荷载施加应符合下列规定：

1 应测读各位移测表读数，可根据需要调整测表读数和剪切千斤顶位置。

2 根据预估最大剪切荷载，宜分 8 级~12 级施加。每级荷载施加后，应立即测读剪切位移和法向位移，5min 后再测读一次，即可施加下一级剪切荷载直至破坏。当剪切位移量增幅变大时，可适当加密剪切荷载分级。

3 试件破坏后，应继续施加剪切荷载，直至测出趋于稳定的剪切荷载值为止。

4 应将剪切荷载退至零。待试件回弹后，调整测表，再进行摩擦试验。

12.8.7 试验结束后，试件剪切面的描述应符合下列要求：

1 量测剪切面，确定有效剪切面积。

2 描述剪切面的破坏情况，擦痕的分布、方向和长度。

3 测定剪切面的起伏差，绘制沿剪切方向断面高度的变化曲线。

4 当结构面内有充填物时，应查找剪切面的准确位置，并应记述其组成成分、性质、厚度、结构构造、含水状态。根据需要，可测定充填物的物理性质和黏土矿物成分。

12.8.8 试验成果整理应符合下列规定：

1 各法向荷载下，作用于剪切面上的法向应力和剪应力分别按下列公式计算：

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (12.8.8-1)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (12.8.8-2)$$

式中： σ ——作用于剪切面上的法向应力（MPa）；

τ ——作用于剪切面上的剪应力（MPa）；

P ——作用于剪切面上的法向荷载（N）；

Q ——作用于剪切面上的剪切荷载（N）；

A ——有效剪切面积（mm²）。

2 绘制各法向应力下的剪应力与剪切位移及法向位移关系曲线，根据曲线确定各剪切阶段特征点的剪应力。

3 将各剪切阶段特征点的剪应力和法向应力点绘在坐标图上，绘制剪应力与法向应力关系曲线，并按库伦表达式确定相应的抗剪强度参数（ f, c ）。

12.8.9 岩石直剪试验记录应主要包括工程名称、取样位置、试件编号、试件描述、含水状态、混凝土配合比和强度等级、剪切面积、各法向载荷下各级剪切荷载时的法向位移及剪切位移，剪切面描述。

12.9 点荷载强度试验

12.9.1 岩石点荷载强度试验可用于各类岩石。

12.9.2 试件可采用钻孔岩芯，或从岩石露头中采取的岩块。在试样采取和试件制备过程中，应避免产生裂缝。

12.9.3 点荷载强度试验应符合现行国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 的有关规定。

附录 A 海上风电场工程岩土物理力学 性质指标试验方法

A.0.1 海上风电场工程岩土物理力学性质指标室内试验方法宜符合表 A.0.1 的规定。

表 A.0.1 海上风电场工程岩土物理力学性质指标室内试验方法

主要岩土指标	试验方法	适用岩土
含水率	烘干法	各类土
密度	环刀法	黏性土、粉土、砂土
	蜡封法	难于切削和易破碎的土
	灌水法	砂土、碎石土
	灌砂法	砂土、碎石土
相对密度	相对密度试验	粒径不大于 5mm，且粒径 2mm~5mm 的质量不大于总质量 15% 的粉土和砂土
液限含水率	联合测定法	有机质含量不大于干质量 5%，粒径小于 0.5mm 的黏性土
	碟式液限仪法	粒径小于 0.5mm 的黏性土
塑限含水率	联合测定法	有机质含量不大于干质量 5%，粒径小于 0.5mm 的黏性土
	搓滚法	粒径小于 0.5mm 的黏性土
液性指数	联合测定法	有机质含量不大于干质量 5%，粒径小于 0.5mm 的黏性土
	碟式液限仪法和搓滚法	粒径小于 0.5mm 的黏性土
	袖珍贯入仪试验	黏性土

续表 A. 0.1

主要岩土指标	试验方法	适用岩土
土粒比重	比重瓶法	粒径小于 5mm 的土
	浮称法	粒径大于等于 5mm 的土, 其中大于 20mm 的颗粒含量小于 10%
	虹吸筒法	粒径大于等于 5mm 的土, 其中大于 20mm 的颗粒含量大于等于 10%
颗粒级配	筛析法	粒径大于 0.075mm, 小于 200mm 的土
	密度计法	粒径小于 0.075mm 的土
	移液管法	
先期固结压力、次固结系数、压缩指数、压缩系数、压缩模量、回弹指数	固结试验	黏性土、粉土、砂土
固结系数	固结试验	黏性土
渗透系数	常水头法	砂土、碎石土
	变水头法	黏性土、粉土
不排水抗剪强度	三轴不固结不排水压缩试验	黏性土、粉土
	直剪快剪试验	
	微型十字板试验	饱和软黏土
ε_{50}	三轴不固结不排水压缩试验	黏性土、粉土
固结不排水强度指标	三轴固结不排水压缩试验	黏性土、粉土
	直剪固结快剪试验	

续表 A.0.1

主要岩土指标	试验方法	适用岩土
固结排水强度指标	三轴固结排水压缩试验	黏性土、粉土、砂土、粒径小于 20mm 的砾类土
	直剪慢剪试验	黏性土、粉土、砂土
动强度指标	振动三轴试验	黏性土、粉土、砂土
	动单剪试验	
	空心圆柱动扭剪试验	
动弹性模量与阻尼比	振动三轴试验	黏性土、粉土、砂土
	共振柱试验	
	空心圆柱动扭剪试验	
动剪切模量与阻尼比	振动三轴试验	黏性土、粉土、砂土
	动单剪试验	
	共振柱试验	
	空心圆柱动扭剪试验	
土与钢管桩界面摩擦角	环剪试验	黏性土、粉土、砂土
残余强度指标	排水反复直剪试验	黏性土、粉土、泥化夹层
	环剪试验	黏性土、粉土
导热系数	热探针法	各类均质土和软岩

A.0.2 海上风电场工程岩土物理力学性质指标原位测试方法宜符合表 A.0.2 的规定。

表 A.0.2 海上风电场工程岩土物理力学性质指标原位测试方法

测试方法	主要岩土指标	适用岩土
静力触探试验	密度	黏性土、粉土、砂土
	固结系数	黏性土、粉土
	不排水抗剪强度	
	有效摩擦角	粉土、砂土
	相对密度	
十字板剪切试验	不排水抗剪强度	饱和软黏土
	灵敏度	
动力触探试验	相对密度	砂土、碎石土
	单轴抗压强度	极软岩、软岩
标准贯入试验	相对密度	粉土、砂土
旁压试验	不排水抗剪强度	黏性土、粉土
	旁压模量	黏性土、粉土、砂土、碎石土、极软岩、软岩
扁铲侧胀试验	侧胀模量	黏性土、粉土、砂土
T形触探试验	不排水抗剪强度	不排水抗剪强度不大于 20kPa 的软黏土
球形触探试验	灵敏度	
钻孔弹模试验	弹性模量	硬黏土、密实砂土和岩体

附录 B 试样要求与管理

B.0.1 单组试验采样数量应满足要求进行的试验项目和试验方法的需要，试验取样数量和过筛标准宜按表 B.0.1 执行。

表 B.0.1 试验取样数量和过筛标准

试验项目	土样数量				过筛标准 (mm)
	黏性土和粉土		砂土		
	原状土 (筒) ϕ10cm×20cm	扰动土 (g)	原状土 (筒) ϕ10cm×20cm	扰动土 (g)	
含水率	1	800	1	800	—
比重	1	800	1	800	—
颗粒分析	1	800	1	800	—
界限含水率	1	500	—	—	0.5
密度	1	—	1	—	—
固结	1	2000	1	2000	2.0
三轴压缩	2	5000	3	5000~ 10000	2.0、20
直接剪切	1	3000	1	3000	2.0
击实	—	30000	—	—	5.0
无侧限抗压强度	1	2000	—	—	2.0
排水反复剪切	1	3000	1	3000	2.0
相对密度	—	—	1	6000	—
渗透	1	2000	1	5000	2.0
动单剪	3	15000	—	15000	2.0、20
振动三轴、共振柱、 空心圆柱动扭剪	—	20000	—	20000	2.0、20
导热系数	—	20000	—	20000	—
化学分析试样风干 含水率	—	500	—	500	2.0
酸碱度	—	500	—	500	2.0
有机质	—	100	—	100	—

B.0.2 采样记录要求应符合下列要求：

1 采取的土样应有取样记录和标签，内容有工程名称、试坑或钻孔编号、高程、取样深度或位置、取样日期。

2 原状土样应在标签上用箭头表示土样上层方向，记录中应有取样说明，内容为土层的变化和地下水位高程，土样现场鉴别和描述及定名、取土方法，取土过程中有无承压水，天气，取土人员和取土日期。

3 标签宜用韧性纸，用不脱色笔写清楚，贴于土样筒外，标签应做好防水措施，并标记土样编号。

B.0.3 土样的包装和运送应符合下列要求：

1 采取原状土或保持天然含水率的扰动土后，应立即封闭取土筒或盛土容器。土筒上所有缝隙，均应以胶布封严，贴上标签，浇注融蜡。无取土筒时，宜将原状土块用纱布包裹后，贴上标签，浇注融蜡，防止水分散失。进行室内力学性质试验的软土样，应竖直存放且与原位方向一致。封闭后原状样应存放于阴凉潮湿地点。

2 土样运输时，原状土筒或封好的土块，均应装入木箱，并注明“小心轻放”“请勿倒置”，储运过程中应采取防冻、防晒和防震等措施。

B.0.4 土样的验收和管理应符合下列规定：

1 土样送达试验单位，应附送样单及试验委托书或其他有关资料。送样单应有原始记录和编号。内容应包括工程名称、试坑或钻孔编号、高程、取土深度、取样方法、取样日期。试验委托书应包括工程名称、工程项目、试验目的、试验项目、试验方法及要求。

2 试验单位接到土样后，应按试验委托书验收。验收中应查明土样数量、编号，土样应满足试验项目和试验方法的要求。可抽验土样质量，验收后登记，编号。登记内容应包括工程名称、委托单位、送样日期、土样室内编号和野外编号、取土地点

和取土深度、试验项目。

3 土样送交试验单位验收、登记后，将土样按顺序妥善存放，应将原状土样和保持天然含水率的扰动土样置于阴凉的地方，防止扰动和水分蒸发。土样从取样之日起至开始试验的时间不应超过 3 周。

4 土样经过试验之后，余土应妥善保管，并标记工程名称及室内土样编号。宜保存到试验报告提出 3 个月以后，委托单位对试验报告未提出任何疑义时，方可处理。

附录 C 试验记录表

C.0.1 固结试验记录表可采用表 C.0.1-1~表 C.0.1-3 的格式。

表 C.0.1-1 固结试验制样记录表

工程名称								
任务单号						试验者		
试样编号						计算者		
取土深度						校核者		
试样说明						试验日期		
仪器名称及编号								
含水率试验								
试样情况	盒号	(盒+湿土) 质量 (g)	(盒+干土) 质量 (g)	盒质量 (g)	水质量 (g)	干土质量 m_d (g)	含水率 w (%)	平均含水 率 w (%)
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
		—	—	—	(4)= (1)-(2)	(5)= (2)-(3)	(6)= (4)/(5) $\times 100$	(7)= $\frac{\sum(6)}{2}$
试验前								
试验后								
密度试验								
试样情况	(环刀+湿土) 质量(g)	环刀质量 (g)	湿土质量 m_0 (g)	试样体积 V (cm^3)	湿密度 ρ (g/cm^3)			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)			
	—	—	(3)=(1)-(2)	—	(5)=(3)/(4)			
试验前								
试验后								
孔隙比及饱和度计算								
土粒比重 $G_s =$								
试样情况		试验前			试验后			
含水率 w (%)								
湿密度 ρ (g/cm^3)								
孔隙比 e								
饱和度 S_r (%)								

表 C.0.1-2 固结试验过程记录表

工程名称								
任务单号					试验者			
试样编号					计算者			
试验日期					校核者			
仪器名称及编号								
经过时间	试样在不同上覆压力下变形							
	kPa		kPa		kPa		kPa	
	时间	量表读数 (0.01mm)	时间	量表读数 (0.01mm)	时间	量表读数 (0.01mm)	时间	量表读数 (0.01mm)
0								
6s								
15s								
1min								
2min15s								
4min								
6min15s								
9min								
12min15s								
16min								
20min15s								
25min								
30min15s								
36min								
42min15s								
49min								
64min								
100min								
200min								
400min								
23h								
24h								
总变形量 (mm)								
仪器变形量 (mm)								
试样总变形量 (mm)								

表 C.0.1-3 固结试验计算表

工程名称								
任务单号					试验者			
试样编号					计算者			
试验日期					校核者			
仪器名称及编号								
试样原始高度 $h_0=20.0\text{mm}$ 试验前孔隙比 $e_0=$				$C_v=\frac{0.848(\bar{h})^2}{t_{90}}$ 或 $C_v=\frac{0.197(\bar{h})^2}{t_{50}}$				
加压 历时 (h)	压力 p (kPa)	试样总 变形量 Δh_i (mm)	压缩后 试样 高度 h (mm)	孔隙比 e_i	压缩 模量 E_s (MPa)	压缩 系数 a_v (MPa ⁻¹)	排水距离 \bar{h} (cm)	固结系数 C_v (cm ² /s)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
—	—	—	(4)= $h_0-(3)$	(5)= $e_0-\frac{(3)(1+e_0)}{h_0}$	—	—	(8)= $\frac{h_i+h_{i+1}}{4}$	—
0								
24								
24								
24								
24								
24								
24								
24								

C.0.2 直剪试验记录表可采用表 C.0.2 的格式。

表 C.0.2 直剪试验记录表

工程名称											
任务单号				仪器名称				试验者			
试样编号				试验方法				计算者			
取样深度				试验日期				校核者			
含水率试验			环刀号	环刀体积 (cm ³)	环刀质量 (g)	饱和前	饱和后	湿密度 (g/cm ³)	干密度 (g/cm ³)	施加的垂直压力 (kPa)	固结沉降量 (0.01 mm)
盒号						(环刀+湿土)质量 (g)	(环刀+湿土)质量 (g)				
盒质量 (g)											
(盒+湿土)质量 (g)											
(盒+干土)质量 (g)											
含水率 (%)											
平均含水率 (%)											
仪器编号		No. =		No. =		No. =		No. =			
垂直压力		p =		p =		p =		p =			
测力计校正系数		C =		C =		C =		C =			
剪切位移 (0.01 mm)	测力计读数 (0.01 mm)	剪应力 (kPa)	测力计读数 (0.01 mm)	剪应力 (kPa)	测力计读数 (0.01 mm)	剪应力 (kPa)	测力计读数 (0.01 mm)	剪应力 (kPa)	测力计读数 (0.01 mm)	剪应力 (kPa)	

C.0.3 环剪法残余强度试验记录表可采用表 C.0.3 的格式。

表 C.0.3 环剪法残余强度试验记录表

工程名称					
任务单号		仪器名称		试验者	
试样编号		试验方法		计算者	
取样深度		试验日期		校核者	
仪器编号			剪前固结时间 (min)		
测力计 1 校正系数 (N/0.01mm)			剪前固结沉降量 (mm)		
测力计 2 校正系数 (N/0.01mm)			抗剪强度 τ (kPa)		
扭矩臂长度 L (cm)			试样内半径 r_1 (cm)		
剪切速率 ($^{\circ}/\text{min}$)			试样外半径 r_2 (cm)		
法向应力 σ'_n (kPa)			试样高度 (cm)		
剪切角位移 ($^{\circ}$)	平均剪切位移 (mm)	垂直位移计 读数 (0.01mm)	测力计 1 读数 (0.01mm)	测力计 2 读数 (0.01mm)	平均剪 应力 (kPa)

C.0.4 土与钢管桩界面特性试验记录表可采用表 C.0.4 的格式。

表 C.0.4 土与钢管桩界面特性试验记录表

工程名称					
任务单号		仪器名称		试验者	
试样编号		试验方法		计算者	
取样深度		试验日期		校核者	
仪器编号			试样内半径 r_1 (cm)		
测力计 1 校正系数 (N/0.01mm)			试样外半径 r_2 (cm)		
测力计 2 校正系数 (N/0.01mm)			试样高度 (cm)		
扭矩臂长度 L (cm)			中心线平均粗糙度 R_{cla} (μm)		
(1) 第一阶段固结: 固结压力 _____ kPa					
经过时间 (____ h ____ min ____ s)			垂直位移计读数 (0.01mm)		
(2) 第一阶段剪切: 剪切速率 _____ mm/min					
剪切角位移 (°)	平均剪切位移 (mm)	垂直位移计读数 (0.01mm)		暂停时间 (min)	
(3) 第二阶段固结: 固结压力 _____ kPa					
经过时间 (____ h ____ min ____ s)			垂直位移计读数 (0.01mm)		
(4) 第二阶段剪切: 剪切速率 _____ mm/min					
剪切角位移 (°)	平均剪切位移 (mm)	垂直位移计读数 (0.01mm)	测力计 1 读数 (0.01mm)	测力计 2 读数 (0.01mm)	平均剪应力 (kPa)

C.0.5 不固结不排水剪三轴试验记录表可采用表 C.0.5 的格式。

表 C.0.5 不固结不排水剪三轴试验记录表

工程名称					
任务单号		仪器名称		试验者	
试样编号		试验方法		计算者	
取样深度		试验日期		校核者	
含水率		密度		—	—
钢环系数 (N/0.01mm)		剪切速率 (mm/min)		围压 (kPa)	
轴向变形 (0.01mm)	轴向应变 ϵ (%)	校正面积 $\frac{A_0}{1-\epsilon}$ (cm ²)	钢环读数 (0.01mm)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	
试样草图					
试样破坏描述					

C.0.6 固结不排水剪三轴试验记录表可采用表 C.0.6 的格式。

表 C.0.6 固结不排水剪三轴试验记录表

工程名称										
任务单号		仪器名称		试验者						
试样编号		试验方法		计算者						
取样深度		试验日期		校核者						
含水率		密度		—	—					
(1) 反压饱和										
围压 (kPa)	反压 (kPa)		孔隙水压力 (kPa)		孔隙水压力增量 (kPa)					
(2) 固结排水										
围压 _____ kPa 反压 _____ kPa 初始孔隙水压力 _____ kPa										
经过时间 (__ h __ min __ s)		孔隙水压力 (kPa)		量管读数 (mL)		排出水量 (mL)				
(3) 不排水剪切										
钢环系数 _____ N/0.01mm 剪切速率 _____ mm/min 围压 _____ kPa										
反压 _____ kPa 初始孔隙水压力 _____ kPa 温度 _____ °C										
轴向变形 (0.01mm)	轴向 应变 ϵ (%)	校正面积 $\frac{A_0}{1-\epsilon}$ (cm ²)	钢环 读数 (0.01mm)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	孔隙 压力 (kPa)	σ'_1 (kPa)	σ'_3 (kPa)	σ'_1/σ'_3 (kPa)	$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$ (kPa)	$\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ (kPa)
试样草图										
试样破坏描述										

C.0.7 固结排水剪三轴试验记录表可采用表 C.0.7 的格式。

表 C.0.7 固结排水剪三轴试验记录表

工程名称											
任务单号		仪器名称		试验者							
试样编号		试验方法		计算者							
取样深度		试验日期		校核者							
含水率		密度		—	—						
(1) 反压饱和											
围压 (kPa)		反压 (kPa)		孔隙水压力 (kPa)		孔隙水压力增量 (kPa)					
(2) 固结排水											
围压_____ kPa 反压_____ kPa 初始孔隙水压力_____ kPa											
经过时间 (__ h __ min __ s)		孔隙水压力 (kPa)		量管读数 (mL)		排出水量 (mL)					
(3) 排水剪切											
钢环系数_____ N/0.01mm 剪切速率_____ mm/min 围压_____ kPa											
反压_____ kPa 初始孔隙水压力_____ kPa 温度_____ °C											
轴向 变形 (0.01mm)	轴向 应变 ϵ_a (%)	校正面积 $V_c - \Delta V_1$ $h_c - \Delta h_1$ (cm ²)	钢环 读数 (0.01mm)	主应 力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	比值 $\frac{\epsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3}$	量管 读数 (cm ³)	剪切 排水 量 (cm ³)	体应变 $\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_c}$ (%)	径向应变 $\epsilon_r = \frac{\epsilon_v - \epsilon_a}{2}$ (%)	比值 $\frac{\epsilon_r}{\epsilon_a}$	应力 比 $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$
试样草图											
试样破坏描述											

C.0.8 三轴蠕变试验记录表可采用表 C.0.8 的格式。

表 C.0.8 三轴蠕变试验记录表

工程名称											
任务单号				仪器名称				试验者			
试样编号				试验方法				计算者			
取样深度				试验日期				校核者			
围压 σ_3 (kPa)								轴向应力 σ_1 (kPa)			
固结后高度 h_c (cm)								剪切后高度 h_j (cm)			
固结后面积 A_c (cm ²)								剪切后面积 A_j (cm ²)			
固结后体积 V_c (cm ³)								剪切后体积 V_j (cm ³)			
时间 t_1			室内 温度 T	经过 时间 t_2	试样 轴向变形 Δh_t	轴向应变 $\epsilon_{1t} = \frac{\Delta h_t}{h_c} \times 100$		试样体积 变化 ΔV_t	体积应变 $\epsilon_{vt} = \frac{\Delta V_t}{V_c} \times 100$		备注
d	h	min	℃	min	cm	%		cm ³	%		

C.0.9 真三轴试验记录表可采用表 C.0.9 的格式。

表 C.0.9 真三轴试验记录表

工程名称													
任务单号		仪器名称				试验者							
试样编号		试验方法				计算者							
取样深度		试验日期				校核者							
上端 荷载 (kN)	下端 荷载 (kN)	左端 荷载 (kN)	右端 荷载 (kN)	上端 位移 (mm)	下端 位移 (mm)	左端 位移 (mm)	右端 位移 (mm)	围压 (kPa)	内体 变 (mL)	外体 变 (mL)	上孔 压 (kPa)	下孔 压 (kPa)	

C.0.10 测定动强度与液化的振动三轴试验数据记录表可采用表 C.0.10 的格式。

表 C.0.10 测定动强度与液化的振动三轴试验数据记录表

工程名称					
任务单号		仪器名称		试验者	
试样编号		试验方法		计算者	
取样深度		试验日期		校核者	
固结前		固结后		固结条件	
试样直径 d (mm)		试样直径 d (mm)		固结应力比 K_c	振动频率 (Hz)
试样高度 h (mm)		试样高度 h (mm)		轴向固结应力 σ_{1c} (kPa)	给定破坏振次 (次)
试样面积 A (cm ²)		试样面积 A (cm ²)		侧向固结应力 σ_{3c} (kPa)	均压时候孔压 破坏标准 (kPa)
体量管读数 V_1 (cm ³)		体量管读数 V_2 (cm ³)		固结排水量 ΔV (mL)	均压时候应变破 坏标准 (%)
试样体积 V (cm ³)		试样体积 V (cm ³)		固结变形量 ΔL (mm)	侧压时候应变破 坏标准 (%)
试样干密度 ρ_d (g/cm ³)		试样干密度 ρ_{dc} (g/cm ³)		振后排水量 (mL)	振后高度 (mm)
振次 (次)	轴向动变形 Δh_d (mm)	轴向动应变 ε_d (%)		动孔隙水压力 u_d (kPa)	动孔压比 u_d/σ'_{3c}

C.0.11 测定动模量与阻尼比的振动三轴试验记录表可采用表 C.0.11 的格式。

表 C.0.11 测定动模量与阻尼比的振动三轴试验记录表

工程名称					
任务单号		仪器名称		试验者	
试样编号		试验方法		计算者	
取样深度		试验日期		校核者	
固结前		固结后		固结条件	
试样直径 d (mm)		试样直径 d (mm)		固结应力比 K_e	
试样高度 h (mm)		试样高度 h (mm)		轴向固结应力 σ_{1c} (kPa)	
试样面积 A (cm ²)		试样面积 A (cm ²)		侧向固结应力 σ_{3c} (kPa)	
体量管读数 V_1 (cm ³)		体量管读数 V_2 (cm ³)		振动频率 f (Hz)	
试样体积 V (cm ³)		试样体积 V (cm ³)		固结排水量 ΔV (mm)	
试样干密度 ρ_d (g/cm ³)		试样干密度 ρ_{dc} (g/cm ³)		固结变形量 ΔL (mm)	
振次 (次)	动应力 σ_d (kPa)	动变形 Δh_d (mm)	动应变 ϵ_d (mm)	动弹性模量 E_d (kPa)	阻尼比 λ (%)

C.0.12 动单剪试验记录表可采用表 C.0.12 的格式。

表 C.0.12 动单剪试验记录表

工程名称					
任务单号		仪器名称		试验者	
试样编号		试验方法		计算者	
取样深度		试验日期		校核者	
时间 (s)	法向位移 (mm)	法向力 (N)	切向位移 (mm)	切向力 (N)	

C.0.14 带弹簧和阻尼器支承端纵向振动共振柱的共振柱试验记录表可采用表 C.0.14 的格式。

表 C.0.14 带弹簧和阻尼器支承端纵向振动共振柱的共振柱试验记录表

工程名称										
任务单号				任务单号						
试样编号				试样编号						
试验日期				试验日期						
仪器名称及编号										
试样情况				计算参数						
试样干质量 (g)				试样干密度 (g/cm ³)						
固结前高度 (cm)				试样质量 m_1 (g)						
固结前直径 (cm)				试样转动惯量 I (g/cm ²)						
固结后高度 (cm)				顶端附加物质量 m_0 (g)						
固结后直径 (cm)				顶端附加物转动惯量 I_0 (g/cm ²)						
固结后体积 (cm ³)				加速度计到试样轴线距离 d_1 (cm)						
试样含水率 (%)				加速度标定系数 β [mV/(981cm/s ²)]						
纵向振动测试结果										
测定 次数	最大 电压值 U (mV)	轴向动 应变 (%)	纵向共 振频率 f_{01} (Hz)	无试样 时系统 纵向共 振频率 f_{01} (Hz)	纵向振 动无量 纲频率 因数 β_1	动弹性 模量 E_d (kPa)	有试样 时系统 纵向振 动时的 对数衰 减率 δ_l	无试样 时系统 纵向振 动时的 对数衰 减率 δ_{0l}	纵向振 动时的 能量比 s_l	阻尼比 λ

C.0.15 自由端扭转共振柱的共振柱试验记录表可采用表 C.0.15 的格式。

表 C.0.15 自由端扭转共振柱的共振柱试验记录表

工程名称																
任务单号				任务单号												
试样编号				试样编号												
试验日期				试验日期												
仪器名称及编号																
试样情况						计算参数										
试样干质量 (g)				试样干密度 (g/cm ³)												
固结前高度 (cm)				试样质量 m_t (g)												
固结前直径 (cm)				试样转动惯量 I_t (g/cm ²)												
固结后高度 (cm)				顶端附加物质量 m_{ft} (g)												
固结后直径 (cm)				顶端附加物转动惯量 I_0 (g/cm ²)												
固结后体积 (cm ³)				加速度计到试样轴线距离 d_1 (cm)												
试样含水率 (%)				加速度标定系数 β [mV/(981cm/s ²)]												
扭转自由振动测试结果																
测定 次数	电荷 输出 电压 U (mV)	自振周期 (s)				自振振幅 (mm)				扭转 自由 振动 频率 f_{nt} (Hz)	动剪 应变 γ (%)	无试 样时 系统 扭转 自由 振动 频率 f_{0t} (Hz)	扭转 无量 纲频 率因 数 β_s	动剪 切模 量 G_d (kPa)	阻尼 比 λ	
		T_1	T_2	T_3	T_4	平均	A_1	A_2	A_3							A_4

C.0.16 自由端纵向振动共振柱的共振柱试验记录表可采用表 C.0.16 的格式。

表 C.0.16 自由端纵向振动共振柱的共振柱试验记录表

工程名称																	
任务单号						任务单号											
试样编号						试样编号											
试验日期						试验日期											
仪器名称及编号																	
试样情况										计算参数							
试样干质量 (g)						试样干密度 (g/cm ³)											
固结前高度 (cm)						试样质量 m_t (g)											
固结前直径 (cm)						试样转动惯量 I_t (g/cm ²)											
固结后高度 (cm)						顶端附加物质量 m_{ft} (g)											
固结后直径 (cm)						顶端附加物转动惯量 I_0 (g/cm ²)											
固结后体积 (cm ³)						加速度计到试样轴线距离 d_1 (cm)											
试样含水率 (%)						加速度标定系数 β [mV/(981cm/s ²)]											
自由纵向振动测试结果																	
测定次数	电荷输出 电压 U (mV)	自振周期 (s)				自振振幅 (mm)				纵向自由 振动频率 f_{nl} (Hz)	轴向应 变 ϵ_d (%)	无试样时 系统纵向 自由振动 频率 f_{0l} (Hz)	纵向无量 纲频率因 数 β_L	动弹性模 量 E_s (kPa)	阻尼比 λ		
		T_1	T_2	T_3	T_4	平均	A_1	A_2	A_3							A_4	平均

C.0.17 空心圆柱动扭剪试验记录表可采用表 C.0.17-1 和表 C.0.17-2 的格式。

表 C.0.17-1 空心圆柱动扭剪试验原始数据记录表

工程名称												
任务单号		仪器名称		试验者								
试样编号		试验方法		计算者								
取样深度		试验日期		校核者								
初始外径 r_0 (mm)		初始高度 H_0 (mm)		固结应力 p_0 (kPa)		试验时间						
初始内径 r_1 (mm)		固结后高 H (mm)		初始孔压 u_0 (kPa)		加载频率 f (Hz)						
试验 阶段	阶段 时间 t (s)	振动 次数 N (次)	轴力 W (kN)	轴向 位移 ΔH (mm)	扭矩 M_T (kN·mm)	扭转 角度 α (rad)	外压 p_o (kPa)	内压 p_i (kPa)	孔压 p_u (kPa)	外径 r_o (mm)	内径 r_i (mm)	

表 C.0.17-2 空心圆柱动扭剪试验应力、应变计算表

工程名称												
任务单号		仪器名称		试验者								
试样编号		试验方法		计算者								
取样深度		试验日期		校核者								
试验 阶段	试验 时间 t (s)	阶段 时间 t (s)	振动 次数 N (次)	轴向 应力 σ_z (kPa)	轴向 应变 ε_z (%)	径向 应力 σ_r (kPa)	径向 应变 ε_r (%)	切向 应力 σ_θ (kPa)	切向 应变 ε_θ (%)	扭剪 应力 $\tau_{z\theta}$ (kPa)	扭剪 应变 $\gamma_{z\theta}$ (%)	

C.0.18 微型十字板剪切试验记录表可采用表 C.0.18 的格式。

表 C.0.18 微型十字板剪切试验记录表

工程名称					
任务单号		试验者			
试验地点		计算者			
试验孔号		校核者			
仪器名称及编号		试验日期			
孔口标高		应变仪编号			
试验环境		稳定水位			
十字板规格 $D = \underline{\hspace{1cm}}$ mm $H = \underline{\hspace{1cm}}$ mm $K'_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ cm ⁻³ 传感器编号: <u> </u> 率定系数 $\xi = \underline{\hspace{1cm}}$ N · (cm/ $\mu\epsilon$)					
序号	试验深度 (m)	原状土	重塑土	灵敏度 S_t	备注
		抗剪强度 c_u (kPa)	抗剪强度 c'_u (kPa)		

C.0.19 T形/球形触探试验记录表可采用表 C.0.19 的格式。

表 C.0.19 T形/球形触探试验记录表

任务单号		仪器编号		试验者	
试验地点		贯入速率		计算者	
试验时间		海水深度		校核者	
试验编号		海水深度潮汐影响校正			
探头尺寸		试验系统下陷深度			
校准参数		探头损伤程度肉眼判别			
探头零漂情况		试验过程的异常现象			
贯入深度 (m)	探头抗力 (kPa)	探杆倾斜程度 (°)	总推力 (kN)	备注	

C.0.20 十字板剪切试验记录表可采用表 C.0.20 的格式。

表 C.0.20 十字板剪切试验记录表

工程名称							
任务单号				试验者			
试验地点				计算者			
试验孔号				校核者			
仪器名称及编号				试验日期			
孔口标高				应变仪编号			
试验环境				稳定水位			
十字板规格 $D = \underline{\hspace{1cm}}$ mm $H = \underline{\hspace{1cm}}$ mm $K'_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ cm ⁻³ 传感器编号: $\underline{\hspace{1cm}}$ 率定系数 $\xi = \underline{\hspace{1cm}}$ N · (cm/ $\mu\epsilon$)							
序号	试验深度 (m)	原状土		重塑土		灵敏度 S_1	备注
		应变仪读数 $R_y(\mu\epsilon)$	抗剪强度 $c_u(\text{kPa})$	应变仪读数 $R_c(\mu\epsilon)$	抗剪强度 $c'_u(\text{kPa})$		

C.0.22 跨孔法波速测试记录表可采用表 C.0.22 的格式。

表 C.0.22 跨孔法波速测试记录表

工程名称																
任务单号						试验者										
钻孔排列方位						计算者										
日期						校核者										
试验地点						仪器编号										
深度 (m)	土层 名称	测斜后的实际 水平距离 (m)			波的传播时间 (ms)						波速值 (m/s)					
		S—R ₁	S—R ₂	R ₁ — R ₂	S—R ₁		S—R ₂		R ₁ —R ₂		S—R ₁		S—R ₂		R ₁ —R ₂	
					<i>t_p</i>	<i>t_s</i>	<i>t_p</i>	<i>t_s</i>	<i>t_p</i>	<i>t_s</i>	<i>V_p</i>	<i>V_s</i>	<i>V_p</i>	<i>V_s</i>	<i>V_p</i>	<i>V_s</i>

注：表中 S 表示发射端，R₁、R₂ 表示接收端。

C.0.23 水的 pH 值试验记录表可采用表 C.0.23 的格式。

表 C.0.23 水的 pH 值试验记录表

水样登记表 编号____至____														
采样日期____年__月__日 至____年__月__日 共__页,第__页														
水样接收人____ 接收日期____年__月__日 分析日期____年__月__日														
序号	站号	采样时间 (h,min)	采样深度 (m)	瓶号	现场水温 (℃)	测定时 水温 (℃)	pH _m			$t_m - t_w$ (℃)	$\alpha(t_m - t_w)$	β	βd	pH _w
							1	2	平均					
1														
2														
3														
4														
5														
6														
pH 计校准			时间____ 室温 t_m ℃ 标准缓冲溶液校准 pH 计的读数 pH _s : (1)____ (2)____ 序号____ 至____								注: pH _m 一栏记录双 样测定 pH 值及其平均值			
分析者:										校对者:				

C.0.24 硝酸银滴定法氯离子试验的数据记录可采用表 C.0.24 的格式。

表 C.0.24 硝酸银滴定法氯离子试验记录表

水样登记表 编号__至__									
采样日期__年__月__日至__年__月__日 共__页, 第__页									
水样接收人_____ 接收日期__年__月__日 分析日期__年__月__日									
序号	站号	采样 时间 (__h、 __min)	采样 深度 (m)	瓶号	测定 样体 积 (cm ³)	消耗氧化银 体积 (cm ³)		ρ_{Cl} (g/dm ³)	备注
						V_w			
						(1)	(2)		
1									硝酸溶液标定: 氯化钠标准溶液氯离子浓度 $\rho = \text{g/dm}^3$; 氯化钠标准溶液体积 $V_1 = \text{cm}^3$; 消耗硝酸银体积 V_s . (1) = cm ³ (2) = cm ³ (3) = cm ³ $\bar{V}_w = \text{cm}^3$
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									

注: V_w 与 \bar{V}_w 分别为双样测定消耗硝酸银体积及其平均值。

C.0.25 土的 pH 值试验记录表可采用表 C.0.25 的格式。

表 C.0.25 土的 pH 值试验记录表

工程名称					
任务单号		仪器名称		试验者	
试样编号		试验方法		计算者	
取样深度		试验日期		校核者	
试验编号	试样质量	pH 测定值			
		1	2	3	4

C. 0. 26 烧失量法有机质试验记录表可采用表 C. 0. 26 的格式。

表 C. 0. 26 烧失量法有机质试验记录表

工程名称						
任务单号				试验者		
试验方法				计算者		
试验日期				校核者		
仪器名称及编号						
试样编号	烘干试样 质量 (g)	坩埚质量 (g)	坩埚+灼烧 试样质量 (g)	灼烧试样 质量 (g)	烧失量 (%)	
					试验值	平均值

C.0.27 重铬酸钾容量法试验的数据记录可采用表 C.0.27 的格式。

表 C.0.27 重铬酸钾容量法试验记录表

工程名称									
任务单号					试验者				
试验方法					计算者				
试验日期					校核者				
仪器名称及编号									
试样 编号	烘干 质量 m_d (g)	重铬酸钾标准溶液			硫酸亚铁标准溶液			有机质含量 O. M. (g/kg)	
		浓度 $C\left(\frac{1}{6}K_2Cr_2O_7\right)$ (mol/L)	用量 V_K (mL)	空白用量 V (mL)	浓度 $c(FeSO_4)$ (mol/L)	用量 V (mL)	空白用量 V_0 (mL)	计算值	平均值

附录 D 空心圆柱动扭剪试验的参数计算

D. 0.1 试样内半径可按下式计算：

$$r_i = \sqrt{\frac{r_{i0}^2 H_0}{H_0 - \Delta H} - \frac{\Delta V_i}{\pi(H_0 - \Delta H)}} \quad (\text{D. 0.1})$$

式中： r_i ——试样内半径（mm）；

r_{i0} ——试样初始内半径（mm）；

H_0 ——试样初始高度（mm）；

ΔH ——试样轴向变形（mm）；

ΔV_i ——试样内腔体变（mm³）。

D. 0.2 试样外半径可按下式计算：

$$r_o = \sqrt{\frac{r_{o0}^2 H_0}{H_0 - \Delta H} - \frac{\Delta V_b + \Delta V_i}{\pi(H_0 - \Delta H)}} \quad (\text{D. 0.2})$$

式中： r_o ——试样外半径（mm）；

r_{o0} ——试样初始外半径（mm）；

ΔV_b ——试样体变（mm³）。

D. 0.3 轴向应力可按下式计算：

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} \times 10^6 + \frac{p_o r_o^2 - p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (\text{D. 0.3})$$

式中： σ_z ——轴向应力（kPa）；

W ——轴力（kN）；

p_o ——外压（kPa）；

p_i ——内压（kPa）。

D. 0.4 径向应力可按下式计算：

$$\sigma_r = \frac{p_o r_o + p_i r}{r_o + r} \quad (\text{D. 0.4})$$

式中： σ_r ——径向应力（kPa）。

D. 0. 5 切向应力可按下式计算：

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_o r_o - p_i r}{r_o - r_i} \quad (\text{D. 0. 5})$$

式中： σ_{θ} ——切向应力（kPa）。

D. 0. 6 扭剪应力可按下式计算：

$$\tau_{x\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)} \times 10^6 \quad (\text{D. 0. 6})$$

式中： $\tau_{x\theta}$ ——扭剪应力（kPa）；

M_T ——扭矩（kN·mm）。

D. 0. 7 最大主应力可按下式计算：

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z + \sigma_{\theta}}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_{\theta})^2}{4} + \tau_{x\theta}^2} \quad (\text{D. 0. 7})$$

式中： σ_1 ——空心圆柱试样单元体所受最大主应力（kPa）。

D. 0. 8 中主应力可按下式计算：

$$\sigma_2 = \sigma_r \quad (\text{D. 0. 8})$$

式中： σ_2 ——空心圆柱试样单元体所受中主应力（kPa）。

D. 0. 9 最小主应力可按下式计算：

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z + \sigma_{\theta}}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_{\theta})^2}{4} + \tau_{x\theta}^2} \quad (\text{D. 0. 9})$$

式中： σ_3 ——空心圆柱试样单元体所受最小主应力（kPa）。

D. 0. 10 广义剪应力可按下式计算：

$$q = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (\text{D. 0. 10})$$

式中： q ——空心圆柱试样单元体所受广义剪应力（kPa）。

D. 0. 11 球应力可按下式计算：

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (\text{D. 0. 11})$$

式中： p ——空心圆柱试样单元体所受球应力（kPa）。

D. 0. 12 最大主应力与最小主应力差的半值可按下式计算：

$$\sigma_q = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (\text{D. 0. 12})$$

式中： σ_q ——空心圆柱试样单元体的最大与最小主应力值之差的
一半（kPa）。

D. 0. 13 中主应力系数可按下式计算：

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (\text{D. 0. 13})$$

式中： b ——中主应力系数。

D. 0. 14 最大主应力方向角可按下式计算：

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2\tau_{x\theta}}{\sigma_x - \sigma_\theta} \right) \quad (\text{D. 0. 14})$$

式中： α ——空心圆柱试样单元体的最大主应力方向角（rad）。

D. 0. 15 试样初始平均固结应力可按下式计算：

$$\sigma'_c = \frac{1}{3}(\sigma'_{1c} + \sigma'_{2c} + \sigma'_{3c}) \quad (\text{D. 0. 15})$$

式中： σ'_c ——试样初始平均固结应力（kPa）；

σ'_{1c} ——试样固结后的最大主应力值（kPa）；

σ'_{2c} ——试样固结后的中主应力值（kPa）；

σ'_{3c} ——试样固结后的最小主应力值（kPa）。

D. 0. 16 固结应力比可按下式计算：

$$K_c = \frac{\sigma'_{1c}}{\sigma'_{3c}} \quad (\text{D. 0. 16})$$

式中： K_c ——固结应力比。

D. 0. 17 轴向应变可按下式计算：

$$\epsilon_z = -\frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad (\text{D. 0. 17})$$

式中： ϵ_z ——轴向应变（‰），以压应变为正。

D. 0. 18 径向应变可按下式计算：

$$\epsilon_r = -\frac{(r_i - r_{i0}) - (r_o - r_{o0})}{r_{o0} - r_{i0}} \times 100 \quad (\text{D. 0. 18})$$

式中： ϵ_r ——径向正应变（‰），以土样径向收缩为正。

D. 0. 19 切向应变可按下式计算：

$$\epsilon_{\theta} = -\frac{(r_{o0} - r_o) + (r_{i0} - r_i)}{r_{o0} + r_{i0}} \times 100 \quad (\text{D. 0. 19})$$

式中： ϵ_{θ} ——切向正应变（‰），以土样切向收缩为正。

D. 0. 20 扭剪应变可按下式计算：

$$\gamma_{\theta} = \frac{2\theta(r_o^3 - r_i^3)}{3H(r_o^2 - r_i^2)} \times 100 \quad (\text{D. 0. 20})$$

式中： γ_{θ} ——轴向与切向间的扭剪应变（‰），以土样逆时针转动为正；

θ ——扭转角度（rad）。

D. 0. 21 最大主应变可按下式计算：

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_{\theta}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_{\theta})^2 + \gamma_{\theta}^2} \quad (\text{D. 0. 21})$$

式中： ϵ_1 ——空心圆柱试样单元体所受最大主应变（‰）。

D. 0. 22 中主应变可按下式计算：

$$\epsilon_2 = \epsilon_r \quad (\text{D. 0. 22})$$

式中： ϵ_2 ——空心圆柱试样单元体所受中主应变（‰）。

D. 0. 23 最小主应变可按下式计算：

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_z + \epsilon_{\theta}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_{\theta})^2 + \gamma_{\theta}^2} \quad (\text{D. 0. 23})$$

式中： ϵ_3 ——空心圆柱试样单元体所受的最小主应变（‰）。

D. 0. 24 广义剪应变可按下式计算：

$$\epsilon_q = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (\text{D. 0. 24})$$

式中： ϵ_q ——空心圆柱试样单元体所受广义剪应变（‰）。

附录 E 扫描电镜法黏土矿物鉴定标准

E.0.1 高岭石鉴定应符合下列规定：

1 用扫描电子显微镜观察，沉积物中高岭土呈蠕虫状、书页状集合体赋存于粒间。单晶为六方板状。

2 用能谱测定高岭石的化学成分，主要元素为硅（Si）、铝（Al），其 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值应为 1.1~1.3。

E.0.2 蒙脱石鉴定应符合下列规定：

1 用扫描电子显微镜观察，沉积物中蒙脱石呈蜂窝状赋存于粒表，呈棉絮状、片状赋存于粒间。

2 用能谱测定蒙脱石的化学成分，主要元素为硅（Si）、铝（Al）、钙（Ca）、钠（Na），氧化钾（ K_2O ）宜以小于 2.8% 为判定标准。

E.0.3 伊利石鉴定应符合下列规定：

1 用扫描电子显微镜观察，沉积物中伊利石呈片状或丝状集合体，赋存于粒表和粒间。

2 用能谱测定伊利石的化学成分，主要元素为硅（Si）、铝（Al）、钾（K），氧化钾（ K_2O ）含量宜以大于 9.9% 为判定标准。

E.0.4 绿泥石鉴定应符合下列要求：

1 用扫描电子显微镜观察，沉积物中绿泥石呈针叶状赋存于粒表，呈绒球状赋存于粒间，其单晶结构为叶片状。

2 用能谱测定绿泥石化学成分，主要元素为硅（Si）、铝（Al）、铁（Fe）、镁（Mg）。除硅、铝外，富含铁、镁是其主要特征。

E.0.5 伊/蒙混层鉴定应符合下列规定：

1 用扫描电子显微镜观察，伊/蒙混层呈丝状，是蒙脱石向

伊利石过渡期的黏土矿物。形态特征是蒙脱石特征逐渐消失，伊利石特征逐渐增强，赋存于粒表和粒间。

2 用能谱测定伊/蒙混层化学成分，主要元素为硅（Si）、铝（Al）、钾（K）、钙（Ca）、钠（Na）。氧化钾（K₂O）含量为2.8%~9.9%。

E.0.6 绿/蒙混层鉴定应符合下列要求：

1 用扫描电子显微镜观察，绿/蒙混层黏土矿物呈蜂窝状和丝状结构，是蒙脱石向绿泥石过渡期的黏土矿物，具有蒙脱石和绿泥石的形态特征。

2 用能谱测定绿/蒙混层化学成分，主要元素为硅（Si）、铝（Al）、铁（Fe）、镁（Mg）、钙（Ca）。

E.0.7 扫描电镜能谱分析结果可按下列标准判断：

- 1 被测元素与标样元素 X 射线能谱拟合良好。
- 2 能谱分析结果与表 E.0.7 内相应矿物组分的量相近。

表 E.0.7 黏土矿物元素归一化成分特征

矿物类型	Na ₂ O (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MnO (%)	FeO (%)	TiO ₂ (%)	总量 (%)
高岭石	—	0.3	45.5	52.7	—	0.6	—	0.9	—	86~88
蒙脱石	1.6	3.3	25.4	62.2	—	3.6	—	3.9	—	78~95
伊利石	1.1	2.9	34.1	49.2	9.9	0.3	0.1	2.2	0.2	90~95
伊/蒙混层	0.6	1.6	20.4	68.2	2.8	0.8	—	5.0	0.6	89~95
绿/蒙混层	1.4	12.1	23.7	40.2	2.5	0.7	—	18.9	0.5	84~93
绿泥石	0.2	19.8	24.5	30.9	0.6	1.9	—	22.1	—	87~90

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
- 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
- 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《土工试验仪器 剪切仪 第2部分：现场十字板剪切仪》
GB/T 4934.2

《土工试验仪器 固结仪 第1部分：单杠杆固结仪》GB/
T 4935.1

《土工试验仪器 固结仪 第2部分：气压式固结仪》GB/
T 4935.2

《土的工程分类标准》GB/T 50145

《气体分析 校准用混合气体的制备 称量法》GB/T 5274

《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406

《压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度》
GB/T 21650

《岩土工程勘察规范》GB 50021

《土工试验方法标准》GB/T 50123

《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266

《水电工程地质勘察水质分析规程》NB/T 35052

《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》
SY/T 5163

中华人民共和国能源行业标准

海上风电场工程岩土试验规程

NB/T 10107—2018

条文说明

制 定 说 明

《海上风电场工程岩土试验规程》NB/T 10107—2018，经国家能源局 2018 年 12 月 25 日以第 16 号公告批准发布。

本规程制定过程中，编制组进行了广泛的调查研究，总结了我国海上风电场工程岩土试验的实践经验，同时参考了国外先进技术法规、技术标准，通过试验取得了勘察、设计和施工重要技术参数。

为便于广大勘察、设计、施工、试验、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《海上风电场工程岩土试验规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

目 次

3	基本规定	222
4	试样制备与饱和	223
4.1	一般规定	223
4.2	试样制备	223
4.3	试样饱和	228
5	土的物理性质试验	229
5.1	含水率试验	229
5.2	密度试验	229
5.4	界限含水率试验	229
5.5	土粒比重试验	229
5.6	相对密度试验	229
5.8	导热系数试验	230
6	土的力学性质试验	232
6.1	固结试验	232
6.2	直接剪切试验	234
6.3	残余强度试验	235
6.4	土与钢管桩界面特性试验	236
6.5	渗透试验	237
6.6	三轴压缩试验	237
6.8	三轴蠕变试验	239
6.9	真三轴试验	240
6.10	振动三轴试验	243
6.11	动单剪试验	245
6.12	共振柱试验	246
6.13	空心圆柱动扭剪试验	248

6.14	微型十字板剪切试验	256
6.15	袖珍贯入仪试验	257
7	原位测试	260
7.1	静力触探试验	260
7.2	T形触探试验	262
7.3	球形触探试验	263
7.4	十字板剪切试验	264
7.5	标准贯入试验	264
7.6	动力触探试验	265
7.7	旁压试验	265
7.8	扁铲侧胀试验	270
7.11	钻孔弹模试验	273
7.12	波速测试	275
7.13	电阻率测试	280
8	水质分析	285
8.1	pH值测定	285
8.2	钙、镁离子测定	285
8.3	氯离子测定	285
8.4	硫酸根离子测定	286
8.5	游离二氧化碳测定	286
8.7	铵离子测定	286
8.8	碱度测定	286
8.9	钾、钠离子测定	287
8.10	总矿化度测定	287
8.11	硫酸盐还原菌测定	287
9	土质分析	289
9.1	pH值测定	289
9.2	易溶盐化学成分分析	289
9.3	土质全量化学成分分析	290

9.4	氧化还原电位测定	290
9.5	腐蚀电流密度测定	291
9.6	有机质试验	291
10	黏土矿物分析	293
10.1	X 射线衍射分析	293
10.2	差热分析	293
10.3	扫描电镜分析	294
11	海底浅层气及含气土试验	296
11.1	海底浅层气测试	296
11.2	海底含气土力学性质试验	297
12	岩石物理力学性质试验	302
12.6	单轴抗压强度试验	302
12.7	单轴压缩变形试验	302
12.8	直剪试验	303

3 基本规定

3.0.3 由于海上难以取到Ⅰ级土试样，满足一定条件时可以采用Ⅱ级土试样进行预固结后再开展土的力学性质试验。现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 规定，除地基基础设计等级为甲级的工程外，在工程技术要求允许的情况下可用Ⅱ级土试样进行强度和固结试验，但宜先对土试样受扰动程度作抽样鉴定，判定用于试验的适宜性，并结合地区经验使用试验成果。

根据国际标准 BS EN ISO 19901-8: 2015 *Petroleum and natural gas industries—Specific requirements for offshore structures—Part 8: Marine soil investigations*（石油天然气行业标准 离岸结构物 第8部分：海洋土勘察），土试样质量等级可通过土试样质量参数 $\Delta e/e_0$ 进行划分，见表 3-1。

表 3-1 土试样质量等级

OCR	$\Delta e/e_0$			
1~2	<0.04	0.04~0.07	0.07~0.14	>0.14
2~4	<0.03	0.03~0.05	0.05~0.10	>0.10
土试样质量等级	Ⅰ（不扰动）	Ⅱ（轻微扰动）	Ⅲ（显著扰动）	Ⅳ（完全扰动）

注： Δe 为固结试验的主固结阶段土试样在原地竖向有效应力下的孔隙比变化，不包括次固结影响； e_0 为土试样的初始孔隙比。

3.0.5 对环刀、透水板、击实仪、液塑限测定仪、固结仪、渗透仪、直剪仪、无侧限压缩仪、三轴仪等专用仪器设备可以参照国家现行标准《土工试验专用仪器校验方法》SL 110~118 进行校验。

4 试样制备与饱和

4.1 一般规定

4.1.1 由于试样直径与试样土粒粒径之比与力学性质有一定影响，如试样直径与试样土粒粒径之比超过某一范围，则所测得的力学指标偏大。本规程参照国内外标准对试样直径与允许的最大土粒粒径之比进行了规定。

4.2 试样制备

4.2.3~4.2.4 击实法制样需要较多扰动土样，且需对击实好的土样进行环刀或取样器取样，操作较复杂；压样法制样的竖向压力的选取目前没有统一的规定，不同的竖向压力进行压样，土样所受应力历史不同，其力学性质表现也不一致；击样法是直接将扰动样击入模具，所耗样品量较少，且直接成型。因此，本规程推荐使用击样法进行制备扰动样。

4.2.8 原状黏性土空心圆柱试样制样方法主要有机械式和电渗式。传统机械式取芯法是在试样外壁由钢丝锯切割完成后，将圆柱形试样水平固定，利用直径不同的钻刀，从小到大依次对试样进行内芯切取，通过渐进式的修正来实现所期望的试样内径规格；电渗式取芯法是对试样施加直流电源正负两极，利用电势降使试样中的水从正极流向负极，这种流动过程由于黏性土的渗透性低而并不显著影响试样的含水量，却可以在负极产生润滑作用，当切割试样外壁和内芯的时候，分别把一根电线连上负极，贯穿于试样的外径和内径尺寸位置，利用张紧的电线切割外壁和内壁，在此条件下，土屑在润滑作用下较易与外、内壁分离。

本规程推荐采用的是新型机械式取芯法，利用黏性土空心圆

柱试样内壁切削器进行内芯钻取，原状黏性土空心圆柱试样与扰动黏性土空心圆柱试样切削方法相同，但制备原状黏性土试样时需注意下述事项：

(1) 所取原状土块需预先用钢丝锯分割成略大于试验所用空心圆柱扭剪仪标准试样规格的长方体土柱，切取原状黏性土块的长、宽需大于空心圆柱扭剪仪的标准试样尺寸 2cm~3cm，高度一般不超过试样标准尺寸 4cm，过高易增加取芯时试样断裂的概率。

(2) 内壁切削过程中，由于刀锋深度有限，单次切土深度过大，不但不能增加切屑数量，反而由于护筒的空钻给试样施加附加扭矩，破坏土体。每次旋入后，将钻杆旋转式退出，旋松护筒与转杆间的定位螺丝，将钻头推上，用小勺掏挖护筒内积土，清理完毕后，将钻头复位旋紧定位螺丝，重复取芯工作。对黏性土空心圆柱试样进行内壁精削时，当内壁切削器钻头接触到试样底部无法继续推进，需再旋转一周钻杆。因为钻头达到试样底部时，由于是螺旋式向下推进，底部内壁不能切削完全。

(3) 对于原状黏性土空心圆柱试样的制备，由于所取实心土样体积较大，对其直接进行抽气饱和难以达到试验所需的饱和要求，需先将实心土样切削成空心圆柱试样，再进行抽气饱和。由于试样为空心圆柱土样，饱和过程需采用专用的空心圆柱饱和装置。饱和时间可以根据土样状况确定，真空度接近当地 1 个大气压后，需继续抽气，继续抽气时间一般为：黏性土继续抽气需大于 1h；密实的黏性土抽气时间需大于 2h。当抽气时间达到上述要求后，徐徐注入清水，并保持真空度稳定。待饱和器完全被水淹没即停止抽气，并释放抽气缸的真空。试样在水下静置时间需大于 10h，然后取出试样并称量其质量。

4.2.9 扰动黏性土空心圆柱试样制备以往通常采用泥浆加压固结法和真空负压法，本规程以河海大学改进的真空负压制备装置为例介绍操作步骤。相比于以往的制样方法，改进的真空负压制

样技术通过三瓣渗透排水体与多个装置同时制作，在缩短制样周期、避免试样二次削切与浪费的同时，在试样含水率与密实度等方面具有更好的一致性与均匀性。

装、拆扰动黏性土空心圆柱试样真空负压制备装置一般采用如下步骤：

(1) 排水底座置于三脚支架上后，将三瓣排水体插入排水底座插槽中，在外部涂一层凡士林，再将顶盖置于三瓣排水体上端。

(2) 在三瓣排水体外围及顶部包裹一层浸润的滤纸，上下两端应用 O 形橡皮圈箍紧。

(3) 在排水底座上铺设一层滤纸，用水浸湿，并在底座相应凹槽处放置密封圈。

(4) 乳胶膜上下端分别外翻 1cm~2cm，套在制样筒上，并用螺栓将制样筒与排水底座通过法兰盘固定。

(4) 借助定位器手动调整中间竖向排水体，确保其与水平面保持垂直。

(5) 拆样时先取下固结筒，将三瓣排水体顶部土体切削至顶盖位置，取下配套顶盖，用钢丝钳将三瓣排水体逐一抽出，最后拆下排水底座，得到初步成型待精削的空心试样。

配制饱和土样时，土的初始含水率宜为液限的 1.5 倍~1.7 倍，含水率过小泥浆难以饱和，含水率过大则需设计高度较大的固结筒以保证真空制备的土样达到足够高度。

为减少土样内部孔洞，需采用分级加载的方式施加真空负压，真空负压施加方案由试验人员根据相关土质和试验方案设定，真空负压需小于后期试验时试样的固结压力，否则会形成超固结土。

扰动黏性土空心圆柱试样真空负压制备装置制备所得的试样不是最终试验所用试样，需要精削。

4.2.10 扰动粉土和砂土空心圆柱试样制备除采用干法、湿法制

样外，也有采用砂雨干法制样和砂雨湿法制样。砂雨干法制样是将干土从固定高度，通过一定直径的漏斗，洒入成样装置的内外膜之间，通过调整漏斗的直径和洒入高度，可以得到不同密实度的粉土和砂土试样。这种制样方法得到的粉土和砂土试样，其初始状态与天然粉土和砂土试样的性质比较类似。砂雨湿法制样和砂雨干法制样类似，区别在于其预先在成样装置内外膜之间注入一定高度的无气水，在洒土过程中，保证液面连续上升，覆盖土的高度，这种方法得到的试样饱和度更大。但相比于干法制样和湿法制样，砂雨干法制样和砂雨湿法制样所得的试样密实度较低。

扰动无黏性土空心圆柱试样成样装置以河海大学所用装置为例。装置安装时，需通过内膜固定器将内膜固定在试样基座上，再根据基座上的卡槽将四瓣式制样内钢模安放在内膜内侧，插入中心定位杆，通过旋转定位杆将之固定在内膜固定器上，用定位杆上的内撑固定四瓣式制样内钢模。将外膜通过 O 形橡皮圈密封（或其他有效方式绑扎）固定在试样基座上，在其外侧安置三瓣式制样外钢模，并用外钢模圆箍锁定。扰动无黏性土空心圆柱试样的填样击实过程示意如图 4-1 所示。

对于干法制样和砂雨干法制样的粉土和砂土空心圆柱试样，可以采用图 4-2 所示的通路法对试样进行真空饱和。真空饱和前先将反压下排水口与无气水缸相连，反压上排水口与装有无气水的过气留水缸连通，过气留水缸再与真空泵连通。开启真空泵，在负压传递作用下，试样中的气体被吸出，无气水缸中的无气水则从反压下排水口进入试样。真空饱和过程需持续 2h~3h，真空负压需小于试样固结压力，否则会形成超固结土。饱和过程中，如果过气留水缸中的气泡速度一直在降低，而一段时间后几乎不出现气泡，则表明气密性良好；如果发现气密性不合格，则应各处检查一遍，确保气密性良好；如果漏气严重且无法解决，需拆样重装。湿法制样和砂雨湿法制样则无需按此法对试样进行

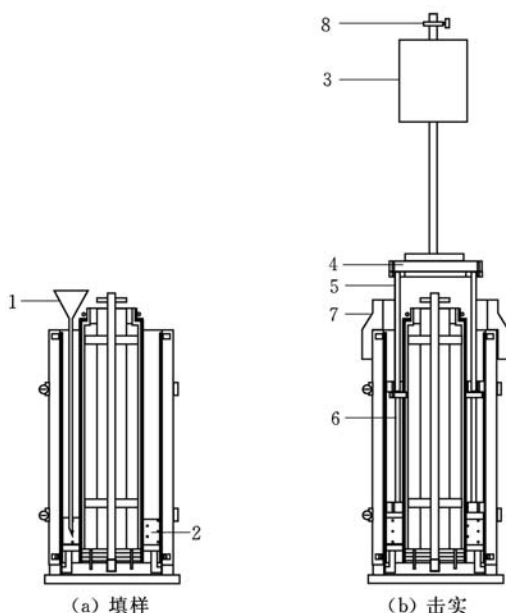


图 4-1 填样击实过程示意图

1—长颈漏斗；2—试样；3—击实锤；4—击实导座；5—上击实筒；
6—下击实筒；7—制样护筒；8—击锤高度限位片

饱和。

4.2.11 为与饱和土有较好的可比性，本条规定的试样尺寸与饱和土一致。近年来从国外引进的一些高级应力路径三轴仪，试样直径大多数为 38mm、50mm、70mm 及 100mm。因此，本规程也适用于这些尺寸的试样。

4.2.13 鉴于圆形试件具有轴对称特性，应力分布均匀，而且试件可以直接取自钻孔岩芯，在室内加工程序简单，本规程推荐圆柱体作为标准试件的形状。在没有条件加工圆柱体试件时，允许采用方柱体试件，试件高度与边长之比为 2.0~2.5，并在成果中说明。

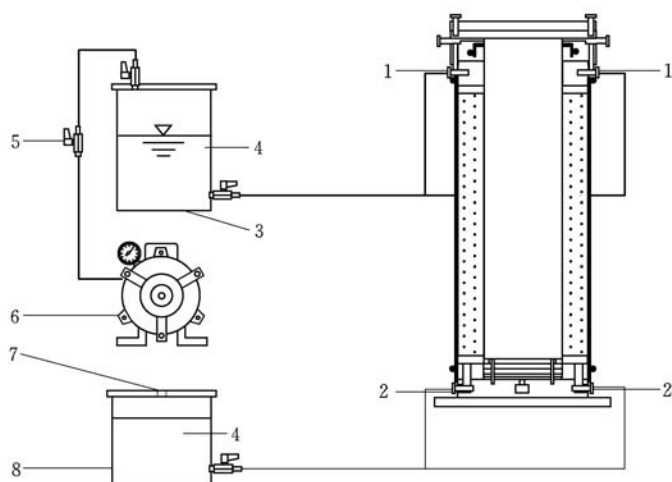


图 4-2 扰动无黏性土空心圆柱试样真空饱和示意图

1—反压上排水口；2—反压下排水口；3—过气留水缸；4—无气水；
5—真空度调节阀；6—真空泵；7—无气水缸通气孔；8—无气水缸

4.3 试样饱和

4.3.1 海洋细粒土中孔隙水含盐量一般低于 2%，孔隙水含盐量对力学特性的影响较小，可以采用真空饱和法对细粒土进行饱和。

4.3.3 粉土和砂土试样的反压力饱和在具体操作过程中，可采用 150kPa~200kPa 反压，同时有效围压为 10kPa，并在此压力下持续作用大约 3h~5h。

5 土的物理性质试验

5.1 含水率试验

5.1.2 采用烘干法测定有机质含量大于5%的土时，在105℃～110℃下经长时间烘干，有机质会逐渐分解而不断损失，所以烘干温度应该控制在65℃～70℃，并注明有机质含量。

5.2 密度试验

5.2.1 测定密度的方法主要是以测定土体积的方法命名，如环刀法、蜡封法。试验时应注意土体失水对密度的影响。

5.4 界限含水率试验

5.4.2 液塑限联合测定的液限含水率，现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 规定对应的落锥下沉深度可分别取17mm和10mm。现行国家标准《土的工程分类标准》GB/T 50145 选取落锥下沉深度17mm对应的含水率为液限；现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021、《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB 50307 均使用落锥下沉深度10mm对应的含水率为液限。

5.5 土粒比重试验

5.5.1 出现高比重或低比重时，需进行复核。高比重时，说明重金属含量高；低比重时可能含有机质土。

5.6 相对密度试验

5.6.1 相对密度试验适用于透水性良好的粉土和砂土，对含细

粒较多的土一般不进行相对密度试验，美国 ASTM 规定小于 0.075mm 土粒的含量不大于试样总质量的 12%。美国垦务局规定：适宜做相对密度试验的土类如表 5-1。当小于 0.075mm 土粒的含量超过 12% 时，可分别作相对密度和击实试验，当相对密度为 70% 对应的干密度小于击实最大干密度的 95%，则采用击实试验。

表 5-1 适宜做相对密度试验的土类

土类	细粒含量 % ($<0.075\text{mm}$)	相对密度试验
各种级配的 纯砂、纯砾	<5	宜
砾石含粉土 砾石含黏性土	<8	宜
砂中含粉土 砂中含黏性土	<12	宜
砂与粉土混合料 砂与黏性土混合料	—	是否适宜，须视级配及塑性而定，有些粉土质砂中细粒含量达 16% 也宜

5.8 导热系数试验

5.8.1 探针法适用范围广，但应注意加热的探针可局部改变水热梯度，对水体温度产生局部影响；水压梯度可以引起水体温度变化，高渗透系数或表面蒸发可以引起高排水量。探针法参考了美国标准 ASTM D5334-14 *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*（美国材料与试验协会—热探针法测定土与软岩的导热系数的标准测试方法）。

5.8.5 已钻孔的试样涂上热油脂是为了将接触电阻降到最低。

5.8.7 使用已知的恒定电流时，例如等效到恒定电流 1.0A，加热丝的温度在 1000s 内变化小于 10K。对于一个小直径针 ($d < 2.54\text{mm}$)，加热持续时间 30s~60s 就能够满足导热系数测量精

度。直径较大的针，加热时间应持续更长，但如果热脉冲没有碰到试样边界，这种方法是有效的，因此要小心不要选择太长加热时间，也要防止潜在的错误。

采集的数据应均匀分布在时间对数轴，如图 5-1 所示。 S_h 为加热阶段的温度与 $\ln t$ 曲线斜率； S_c 为冷却阶段的温度与 $\ln[t/(t-t_1)]$ 曲线斜率（ t_1 为加热段时间）。测试初始和末尾部分，由于存在瞬态条件和边界效应，不宜用于曲线拟合。也可使用 \log_{10} 的半对数坐标，分析时取温度和 $\log_{10} t$ 的曲线斜率，加热阶段斜率为 S_{h10} ，冷却阶段为 S_{c10} 。

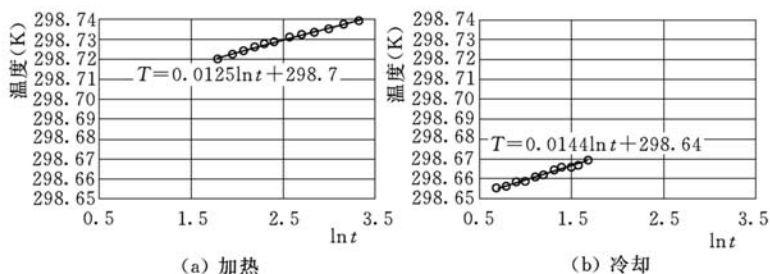


图 5-1 典型的试验结果

6 土的力学性质试验

6.1 固结试验

6.1.2 随着工程建设的发展,以及为测定土的先期固结压力 p_c ,需要压力高、准确度高的压力设备,目前国内常用的加压设备有三种:杠杆式、气压式和磅秤式,也有用液压加压设备。本规程没有规定具体形式,最大允许误差可参照现行国家标准《土工试验仪器》GB/T 4935及《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406的技术条件要求。

6.1.3 第1款对原状试样的固结试验,在切削试样时若对土的扰动程度较大,则影响试验成果,因此切削土样时需要尽可能避免对土样的扰动。图6-1所示的是以不同扰动程度的试样进行固结试验的结果估算厚6m~7m土层的沉降过程。

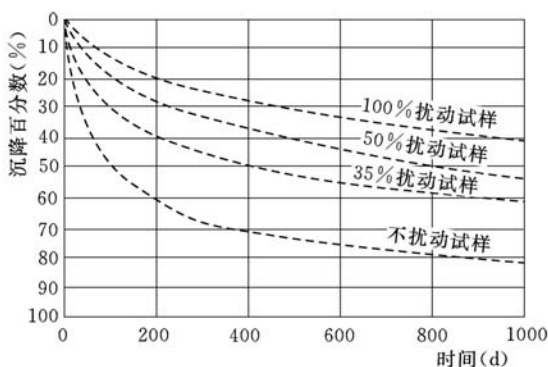


图 6-1 不同扰动程度的试样估算的沉降过程

第8款关于加压率。固结试验中一般规定加压率等于1,即后一级荷载增量与前一级荷载相等。由于加压率对确定土的先期

固结压力有影响，特别是软土，这种影响更为明显，因此，本款中规定：如需测定土的先期固结压力，加压率宜小于 1，可采用 0.5 或 0.25，在实际试验中，可根据土的状态分段采用不同的加压率，例如在孔隙比与压力的对数关系曲线最小曲率半径出现前，加压率可小一些，而曲线尾部直线段加压率可等于 1。

第 12 款、第 13 款关于稳定标准。目前国内外的土工试验标准（或规程）大多采用每级压力下固结 24h 的稳定标准，一方面考虑土的变形能达到稳定，另一方面也考虑到每天在同一时间施加压力和测记变形读数。本规程规定每级压力下固结 24h 作为稳定标准。特殊土需要更长固结时间。而当试验中仅测定压缩系数时，施加每级压力后，以量表读数每小时不大于 0.01mm 为稳定标准。当试样的渗透系数大于 10^{-5} cm/s 时，允许以主固结完成作为相对稳定标准。

6.1.7 先期固结压力 p_c ，本条推荐采用目前应用较普遍的卡萨格兰德图解法。具体步骤为：选取适当比例的纵横坐标作 $e - \lg p$ 曲线，在曲线上找出最小曲率半径 R_{\min} 点 O。过 O 点作水平线 OA、切线 OB 及角 AOB 的平分线 OD，OD 与曲线的直线段 C 的延长线交于点 E，取对应于 E 点的压力值为该原状土的先期固结压力（图 6-2）。

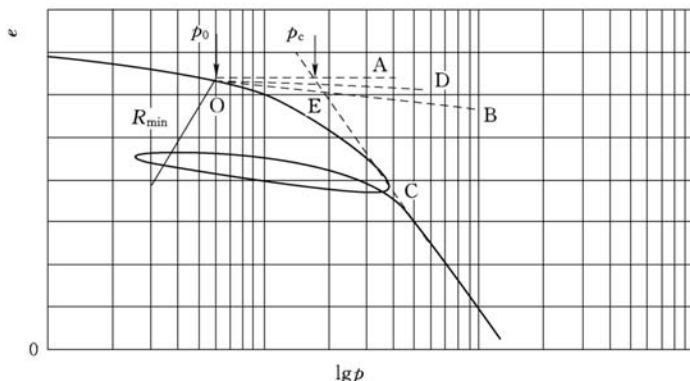


图 6-2 卡萨格兰德图解法求 p_c 示意图

6.1.8 一般认为,用时间对数法确定理论零点误差较大。这样按时间对数坡度法确定 t_{50} , 所求得的 C_v 值误差就更大。因此,本规程推荐采用时间平方根法和时间对数法。在应用时,先用时间平方根法求 C_v 。如不能准确定出开始的直线段,再用时间对数法。

6.1.9 次固结系数可以通过固结试验求得,在孔隙比与时间的半对数关系曲线上,次固结系数即为次固结曲线段的斜率。

6.2 直接剪切试验

6.2.1 用直接剪切试验确定土的强度参数 c 和 φ 的方法主要有三种,即快剪、固结快剪和慢剪。每种试验方法适用于一定排水条件下的土体,相应于土体的工作状态。因此,在选择试验方法时,需注意所采用的方法尽量反映土的特性和地基的工况,并与计算方法相匹配。

直接剪切仪的缺点是不能有效地控制排水条件。对于渗透系数大于 10^{-6} cm/s 的细粒土,进行快剪、固结快剪试验时,试样仍然是排水或部分排水;对于土颗粒粒径小于 2mm 的砂土,渗透系数一般大于 10^{-4} cm/s,在实际工程中往往固结完成,不管进行固结快剪还是慢剪试验,试样都可以较顺畅地排水,工程中有时也可以采用固结快剪试验获得砂土的排水强度参数。

6.2.4 国际标准 BS EN ISO 19901-8: 2015 *Petroleum and natural gas industries—Specific requirements for offshore structures—Part 8: Marine soil investigations* (石油天然气行业标准 离岸结构物 第 8 部分: 海洋土勘察) 建议: 快剪试验对试样进行预固结处理恢复其应力状态,当超固结比大于 1 时,试样在 75%~80% 先期固结压力下固结;当超固结比不大于 1 时,试样在 75%~80% 天然土层有效自重应力下固结。

当土质松软时,为防试样挤出,可以分级施加荷载,分级加荷间隔时间需要根据土样软硬程度通过经验确定,保证加下一级

荷载时试样不造成破坏。

6.2.5 以剪切位移作为选值标准，虽然方法简单，但从理论上讲不太严格，因各种不同类型破坏时的剪切位移并不完全相同，即使对同一种土，在不同的垂直荷载作用下，破坏剪切位移亦不相同，因而只有在无明显峰点时，才允许采用此法。

6.2.6 剪切速率对试验结果具有影响。一方面是剪切的快慢影响试样的排水状态，另一方面是对黏滞阻力的影响，剪切速率愈快黏滞阻力愈大，试验结果也愈大，反之亦然。快剪、固结快剪试验的剪切速率规定为 $0.8\text{mm/min} \sim 1.2\text{mm/min}$ ，要求在 $3\text{min} \sim 5\text{min}$ 内剪损，是为了尽量避免试样在剪切过程中排水。实际上对于渗透系数大于 10^{-6}cm/s 的土，即使加快剪切速率也难免排水，需要用三轴压缩试验测定其不排水强度。

6.2.8 参照国内外经验，慢剪试验的剪切速率小于 0.02mm/min 时试样能充分排水。

6.3 残余强度试验

6.3.1 细粒土或泥化夹层试样在某一有效压力作用下进行剪切试验时，当剪应力达到峰值以后，若继续剪切，剪应力随剪切位移增加而显著降低，最后达到一个稳定值，该稳定值称土的残余强度。

扰动样通常与原状样的残余强度相接近。因此，当选取原状土样有困难时，可以取扰动土重塑后进行试验。

排水反复直接剪切试验是通过剪切后拉回的反复剪切方式，来实现大剪切位移，该方法简单易行，一般用于原状样与重塑样，但多次反复剪切后由于土体损失其剪切面有时不在同一个面上，且反复剪切会影响土颗粒的定向排列，强度衰减规律不是很好；环剪试验可以连续地进行环向大位移剪切，但原状样制备较困难，一般用于重塑土。

6.3.3~6.3.7 参考美国标准 ASTM D6467 - 13 *Standard Test*

Method for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils (扭转环形剪切试验测定黏性土排水残余强度的标准试验方法) 与英国标准 BS 1377 - 7: 1990 *Methods of test for Soils for civil engineering purposes—Part 7: Shear strength tests (total stress)—6 Determination of residual strength using the small ring shear apparatus* (土木工程土的试验方法 第 7 部分: 总应力抗剪强度试验 6 用小型环剪设备测定残余强度)。

土达到残余强度时, 土颗粒已完全定向排列, 其剪切面上的孔隙水压力已充分消散, 故测定残余强度要采用排水剪。

6.4 土与钢管桩界面特性试验

6.4.1 根据英国 Society for Underwater Technology 的 *Guidance Notes for the Planning and Execution of Geophysical and Geotechnical Ground Investigations for Offshore Renewable Energy Developments* (海上可再生能源开发项目地球物理与岩土工程调查规划和执行指导说明), 土与钢管桩界面特性试验建议采用环剪法, 该法可以较好地模拟打桩施工过程中钢管桩与土界面较大的相对位移。

环剪法界面特性试验参考了国际标准 BS EN ISO 19901 - 8: 2015 *Petroleum and natural gas industries—Specific requirements for offshore structures—Part 8: Marine soil investigations* (石油天然气行业标准 离岸结构物 第 8 部分: 海洋土勘察)。界面特性试验其他方法还包括直接剪切试验和拉拔试验, 当模拟钢管桩打入过程时, 桩土产生较大切向相对位移, 采用环剪法较为合理。

6.4.3 粗糙度按照现行国家标准《产品几何技术规范 (GPS) 表面结构 轮廓法 术语、定义及表面结构参数》GB/T 3505 的相关规定计算。当缺乏实际接触面资料时, 可以采用 $20\mu\text{m}$ 的

轮廓单元的平均高度粗糙度。

6.4.4 本条第1款规定垂直压力的最小值不低于50kPa是为了减小侧壁摩擦力的影响。

6.5 渗透试验

6.5.1 一般采用70型渗透仪进行渗透试验，常水头渗透试验适用于粗粒土。采用南55型渗透仪进行渗透试验，变水头渗透试验适用于细粒土。国外有的标准（如JIS）规定：常水头渗透试验适用于渗透系数较大的试样：即 $k = 10^{-2} \text{ cm/s} \sim 10^{-3} \text{ cm/s}$ ；变水头渗透试验适用于渗透系数较小的试样，通常指 $k = 10^{-3} \text{ cm/s} \sim 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。至于极高和极低透水性的土，需要采用特殊的试验方法或通过间接的推算求取渗透系数。

6.5.2 关于试验用水问题。水中含气对渗透系数的影响主要由于水中气体分离，形成气泡堵塞土的孔隙，致使渗透系数逐渐降低，因此，试验中要求用无气水，最好用实际作用于土中的天然水。本规程规定采用的纯水要脱气，并规定水温高于室温 $3^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ ，目的是避免水进入试样因温度升高而分解出气泡。

6.6 三轴压缩试验

6.6.1 目前三轴试验试样直径分别为39.1mm、61.8mm及101mm，按照试样直径与颗粒粒径之比大于5.0的要求，试样粒径不大于20mm。

6.6.2 近年从国外引进了一些三轴压缩仪，试样的直径大多数为38mm、50mm、70mm及100mm，也可参照本条进行试验。

6.6.4 对试样进行预固结处理，可以减少由于取样与样品处理引起的试样扰动。现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011规定采用室内剪切试验时，推荐选择三轴压缩试验的自重应力下预固结的不固结不排水试验。

根据国际标准 BS EN ISO 19901-8: 2015 *Petroleum and*

natural gas industries—Specific requirements for offshore structures—Part 8: Marine soil investigations (石油天然气行业标准 离岸结构物 第8部分:海洋土勘察),为消除试样扰动影响,除了预固结法之外,还有一种 SHANSEP (stress history and normalized soil engineering parameters 应力路径与归一化土性参数)法,该方法需要制备多个试样进行正常固结、超固结的三轴压缩试验,适用于低灵敏度、非自然胶结和结构性不太强的黏性土。SHANSEP 法认为,在固结应力等于 1.5 倍~2.5 倍现场土的先期固结压力条件下,土样的固结不排水抗剪强度能更真实地反映现场土原有的强度特性,且不排水抗剪强度与固结应力成正比,需采用先期固结压力对应的不排水抗剪强度。

6.6.8、6.6.12 三轴压缩试验的固结分为各向等压固结、各向不等压固结。 K_0 固结为一种特殊的各向不等压固结,适合于只发生竖向变形,无侧向变形的地基土。如三轴仪具备应力式控制功能,可以模拟原位土层应力状态的 K_0 固结。应变控制式三轴仪只能做到各向等压固结,固结压力可以选用原位土层的平均有效应力。

第 6.6.8 条中的孔隙水压力消散度即固结度。

6.6.15 无法取得多个均匀试样时,可以考虑使用,但需谨慎使用。一个试样多级加荷试验一般采用三级加荷,累计的轴向应变应不超过 20%,因此该试验方法不适用于脆性、高灵敏度、破坏应变较小的土样。一个试样的代表性低于多个试样的代表性,故本试验仅限于无法取得多个试样,或多个试样彼此性质不均匀的情况,并不建议替代作为常规方法采用。

饱和土的三轴不固结不排水剪试验得到的强度一般不随围压而改变,海洋原状黏性土一般为饱和土,一个试样多级加荷试验对于饱和土三轴不固结不排水剪试验意义不大,一般用于非饱和土的不固结不排水剪试验,故本规程没有列一个试样多级加荷的不固结不排水剪试验。固结排水剪试验中,试样在排水剪切过程

发生剪缩或剪胀，因此也不适用一个试样多级加荷。

6.6.16 本条第2款对于第一级围压作用下试样剪切完成后，卸除轴向压力，即测力计读数为零，使试样恢复到各向等压受力状态，再施加下一级围压，这样可以消除固结时偏应力的影响，不致产生轴向蠕变变形，以保持试样在各向等压下固结，故标准作了卸除轴向压力的规定。

一个试样多级加荷试验过程中，往往会出现前一级围压下的破坏大主应力大于下一级的围压，这时试样受到“预压力”的作用，受力条件复杂，为减小这一影响，规定后一级的围压应等于或大于前一级围压下试样破坏时的最大主应力。

本条第3款关于一个试样多级加荷三轴试验的各级剪切变形随土的种类不同相差很大，故不能作统一规定。基本原则是第一级剪切变形与多个试样试验的控制变形一致，最后一级达到的累积变形以不超过20%，中间剪切的轴向变形无法作出统一规定。各级剪切中，可以同时计算有效主应力比或绘制有效应力路径曲线来控制。破坏点的确定与多个试样破坏标准的确定相一致。

对于软黏土及塑性大的土，因破坏点不明显，难以根据峰值或稳定值的近似点确定施加下一级围压的标准，因此可以按预先设定的轴向应变，施加各级围压。一般可以按以下标准进行：第一级，轴向应变至16%；第二级，轴向应变至18%；第三级，轴向应变至20%。

6.8 三轴蠕变试验

6.8.3 蠕变试验是否排水，需根据工程实际条件、土性等情况确定。

温度是影响蠕变试验测试精度的重要影响因素之一，温度变化会引起土体本身黏性的变化与体积的改变，温度高，蠕变性增加。温度还影响试验仪器尤其是电子量测系统的精度。因此在试验中尽量控制环境温度不变，并予以记录。

后期变形发展缓慢，可以适当延长时间间隔，可以参考如下规律记录数据：如 24h 内轴向应变的变化量小于 5‰，按 3h 读数一次；24h 内轴向应变的变化量小于 1‰，按 6h 读数一次；24h 内轴向应变的变化量小于 0.2‰，按 12h 读数一次。

蠕变试验有两种不同的加载方式，即分别加载和分级加载。目前国内外的室内蠕变试验多采用分级加载方法。可以根据 Boltzmann 叠加原理，将分级加载的蠕变试验数据换算为分别加载成果。

6.9 真三轴试验

6.9.2 真三轴试验对试样各个互相垂直的主应力面分别施加最大主应力 σ_1 、中主应力 σ_2 及最小主应力 σ_3 ，测定相应的主应变 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 和体积变化等。真三轴试验可以模拟不同应力路径下土的应力-应变关系。每组试样的最小主应力按倍数增加，例如可以分别取 200kPa、400kPa、600kPa、800kPa 等。

6.9.3 真三轴加载方式有刚性加载、柔性加载、刚柔复合加载 3 种。刚性加载真三轴 [图 6-3 (a)]是试样安装在 6 个刚性板之内，每一块板可在与之相垂直的另两块板上滑动，当在三个主应力方向施加压力时，试样产生相应的主应变，特点是应变大，应力和应变均匀，主应力轴不发生旋转，但刚性板与试样间的摩擦阻力不可以忽略。柔性加载真三轴 [图 6-3 (b)]为柔性袋加载，在试样的 6 个面上均为柔性橡皮膜袋，其内填充液体，通过对液体施加压力，借以对试样施加主应力，特点是加载方便，在应变较小时应力均匀，但应变较大时应力分布不均，柔性膜袋易相互干扰，而且应力加载能力较低，加载应力较大时橡皮膜袋易吹破。刚柔复合加载包括两刚一柔组合和一刚二柔组合加载方式。二刚一柔组合真三轴 [图 6-3 (c)]的最大主应力和中主应力方向采用刚性加载，最小主应力方向采用柔性加载；一刚二柔组合真三轴 [图 6-3 (d)]的最大主应力采用刚性加载，中主应力方向和最小主应力方向采用柔性加载。

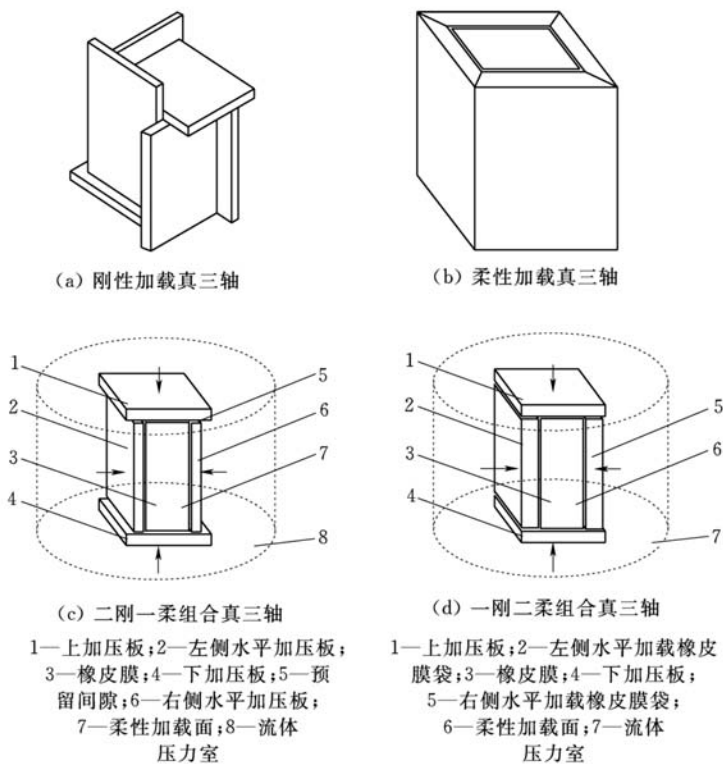


图 6-3 不同加载方式的真三轴设备

表 6-1 国内外真三轴仪的试样尺寸和加载方式

研发机构	设备属性	
	试样尺寸 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	加载方式
伦敦大学	84×81×53	复合
剑桥大学	70×70×70	刚性板
英国萨里大学	100×100×100	柔性
美国 GCTS	75×75×150	复合
美国 Ko 和 Scott	90×90×90	柔性

续表 6-1

研发机构	设备属性	
	试样尺寸 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	加载方式
日本 SEIKEN	100×100×100	复合
日本古藤株式会社	25.6×88.9×88.9	复合
英国 GDS	75×75×150	复合
河海大学	70×70×35 120×120×60	复合
西安理工大学	70×70×70	复合
同济大学	70×70×70	复合
香港理工大学	70×70×140	复合
长江科学院	300×300×600	复合

真三轴的试样一般为长方体或立方体,表 6-1 中列出了目前真三轴仪的试样尺寸和加载方式。根据三轴仪的实践经验,对粗粒土试样最小面长度一般不小于最大颗粒粒径的 5 倍,对细粒土试样最小面长度一般不小于最大颗粒粒径的 10 倍。本规程没有对试样尺寸作规定,试验中依据土样最大粒径选用仪器,或依据仪器尺寸限制试样的最大粒径。

有研究表明,砾石土与刚性板间的接触面摩擦系数可达到 0.4,因此中主应力加压板与试样接触面需采取减摩措施,以有效减小加压板与试样接触面的摩阻力。

根据目前统计资料,二刚一柔复合加载方式是目前国内外应用最广的真三轴加载方式,因此本规程对二刚一柔复合加载方式的真三轴试验设备和操作步骤作出相关规定。其他加载方式的试验操作与成果整理可以参考二刚一柔加载方式进行。

6.9.4~6.9.6 真三轴试验的加载与控制以最大主应力方向的加载速率为主,中主应力和最小主应力方向的加载速率按相应应力路径自动施加。

6.9.7 试验成果整理中,给出了最小主应变的计算方法,如果仪器为刚性板加载,其最小主应变的计算参照中主应变的计算公式。

真三轴试验的破坏点选取可参考常规三轴试验取 $\epsilon_1 = 15\%$,经过论证也可根据工程情况选取破坏应变值。

真三轴仪试验成果的破坏准则,主要有摩尔-库伦准则、拉德-邓肯准则、松岗元-中井(SMP)准则等,可根据工程需要选取相应的破坏准则进行成果整理。

6.10 振动三轴试验

6.10.1 波浪作用会使海床地基土体所受主应力产生连续旋转,而振动三轴试验不能实现试验对象的主应力轴旋转,所以该试验在模拟海相土受到波浪作用的性状方面存在一定的局限性。

振动三轴试验中试样的动应变幅值一般大于 10^{-4} ,采用霍尔效应传感器可以进行动应变幅值为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间的振动三轴试验。

6.10.4 在部分振动三轴仪中,特别是可以施加拉应力的设备,试样的帽盖有时和轴力传感器嵌固在一起,因此压力室中的水压只能施加在试样的侧边,而无法作用于试样轴向。此时,即使是等压固结,也需要单独控制轴向压力的施加,使之与侧向水压力相等来实现等压固结。

逐级加载的方式,实际上就是对试样先等压固结后,再偏压固结,这种加载方式相对于一步到位的加载,会对土体性状产生不同的影响。但是分次逐级叠加,比一次施加轴力所造成的稳定性上的负效应会少得多。

由于海相土一般具有高含水率、低密度、低强度、高压缩性等特点,沉降压缩量大,但排水固结较缓慢,所以判断试样固结是否稳定时需谨慎。

6.10.5 本条是动强度试验步骤的规定。

3 关于动强度试验采用正弦激振波的频率，一般根据具体试验要求和仪器参数设置选择，或者结合具体工程情况选取不同的频率值进行试验，然后选择最接近于工程实际的频率值；总的来说，频率取值参考范围可以选为 $0.05\text{Hz} \sim 0.2\text{Hz}$ ，一般为 0.1Hz 。

4 在等压固结下，试样孔隙水压力达到有效侧向固结应力（通常称为初始液化状态）可以作为饱和粉土和砂土的液化破坏标准；在偏压固结条件下，试样即使液化，其孔隙水压力也不会达到初始有效侧向固结应力水平，但试样的轴向应变会近似线性地快速增大累积，最终产生使土试样失效的轴向应变，称之为累积轴向应变，建议采用双幅轴向动应变极大值与极小值之差达到 5% 或单幅轴向动应变峰值达到 5% 作为土样液化失效标准。外荷载作用导致砂土液化，包括波浪荷载以及地震作用，其中判断地震作用使砂土液化可以根据振动循环次数 N 达到预估地震的相应限值。表 6-2 列出了不同地震震级对应的等效循环次数参考值。

表 6-2 地震作用的等效循环次数参考表

地震震级 M	6	6.5	7.0	7.5	8.0
等效循环次数 N	5	8	10	20	30

6.10.6 本条是关于动强度试验成果整理的规定。

1 关于动强度的计算：在规定的破坏标准下，由几个不同动剪应力值的破坏试验得到破坏振次，绘制动剪应力与破坏振次的关系曲线。再根据动强度标准所规定的破坏振次，寻找相应的动剪应力值，作为土体的动强度。

2 关于动强度试验曲线的绘制：每条曲线上都需要标明试样的密度、试验侧压力、固结应力比和破坏标准等。绘制半对数坐标上的动剪应力 τ_d 和破坏振次 N_f 的关系曲线，用以确定标准破坏振次对应的动剪应力，即动强度值。绘制曲线用以评价有

效应力和判断液化势等，其中纵坐标为动孔隙水压力 u_d 与两倍振前试样 45° 斜面上的有效法向固结应力 σ'_0 之比，是归一化表示方法。当有多条不同围压下得到的动孔隙水压力与破坏振次关系曲线时，可以按此归一化方法，分析围压对动孔隙水压力发展的影响。对于黏性土而言，其动孔隙水压力耗散需要时间，在反映试样内部的动孔隙水压力变化方面具有一定难度。

海相土有别于陆相土，其承受较大的水压及初始地应力，不同地层土体的刚度相差较大，所以整理试验成果时需根据实际工况选用不同围压下动应力与破坏振次的关系。

6.10.7 本条是动弹性模量和阻尼比试验的规定。

1 对动力试验而言，选择不同的试验加载方式，最基本的要求是能反映实际工程问题中土体所经受的初始应力、动力变化以及排水条件。动力试验多数在不排水条件下进行，一定因素上是为了排除固结产生塑性变形的影响。实际工程问题中，动荷载作用下也可能存在排水情况，因此也可以进行排水或者半排水的振动三轴试验。

3 在同一试样上选用允许施加的动应力的级数时需避免孔隙水压力明显升高。

6.11 动单剪试验

6.11.1 不排水剪切条件对应于体积恒定式，在研究砂土液化时可以进行体积恒定式试验。排水剪切条件对应于压力恒定式。

6.11.2 约束环应为低摩擦的试样滑环，可以使试样处于单剪条件下，试样横截面面积保持不变。圆柱形试样的侧向约束环通常是金属丝强化膜或多层刚性环。正方形试样的侧向约束环通常是堆叠的空心板或铰链的固体板，叠环或板的厚度需小于 $1/10$ 试样厚度。

6.11.4 在试样上施加的最大法向压力，一般不小于土层的计算压力。

6.11.5 动剪试验的波形,需充分考虑海洋环境下的波浪等荷载波形。

剪切向加载控制中可以选择荷载控制,也可以选择位移控制。荷载控制需要估算刚度值,并根据经验来确定。

6.11.6 对于排水剪切需要根据工程实际设置法向压力,对于不排水剪切需要设置法向位移不变。

对砂土而言动强度试验又称为液化试验。

6.12 共振柱试验

6.12.4 本条是试样安装的规定。

3 对于磁共振类型的共振柱,翻起乳胶膜并扎紧在上压盖上后,按线圈座编号,将对应的线圈套进磁钢外极。

5 对于磁共振类型的共振柱,在拆除对开圆模前,用引线将加力线圈与功率放大器相连,并将加速度计与电荷放大器相连。以 GZZ-50 型共振柱仪为例,激振器、位移传感器、加速度传感器都放在压力室中,安装在水面以上可以上下移动使之与试样接触但不能扭转的圆盘上。试样用橡皮膜包扎安装在水面以下,围压和轴向压力都用压缩空气施加。轴向压力与围压可以不相等。如果激振器和传感器都安装在试样顶端,试样的顶端自由,轴向压力和围压相等,则只能在各向等压作用力下试验。

6.12.5 海相砂中的钙质砂在较高荷载作用下易发生颗粒破碎,因此钙质砂试样不等向固结时,若 5min 内轴向变形增量不大于 0.005mm,则可判断钙质砂试样固结稳定。

海相土中一般含有较多的可溶盐,具有腐蚀性,尽量避免对一个试样进行长时间的反复试验,以防止土样中的可溶盐腐蚀仪器设备,并且试验结束后需用清水反复清洗仪器设备,尤其是橡胶膜和量管。

6.12.6~6.12.7 在稳态强迫振动法试验中,对于磁共振类型的共振柱,还需要开启信号发生器。

海上风电场工程面临的海洋地质、动应力条件一般较复杂，因此试验宜制备多个性质相同的试样，根据海上实际工程条件，在不同围压和不同固结应力比下进行试验，一般采用 1 个~4 个围压，1 个~3 个固结应力比。

6.12.8 本条是试验成果整理的规定。

2~4 无量纲频率因数 β_s 、 β_L 可以参照图 6-4 曲线确定，其中 T_s 为 $\beta_s \tan \beta_s$ ， T_L 为 $\beta_L \tan \beta_L$ 。

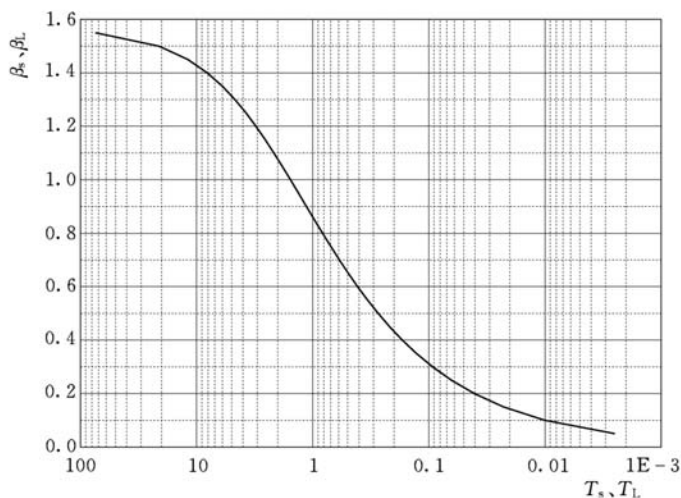


图 6-4 β_s 与 T_s 、 β_L 与 T_L 关系曲线

6 有弹簧支撑时用自由振动法测定试样阻尼比时，需要测定有试样和无试样时仪器转动部分扭转振动或纵向振动时的对数衰减率。以自由扭转振动为例，当仪器扭转部分发生共振时，切断激振器电源停止激振，使转动部分自由振动，记录振幅随时间的衰减关系曲线 [图 6-5 (a)]。然后以波峰数 N 为横坐标，振幅 A 为对数纵坐标在半对数坐标上绘制振幅 A 与波峰数 N 的关系曲线 [图 6-5 (b)]，直线的斜率即为对数衰减率。

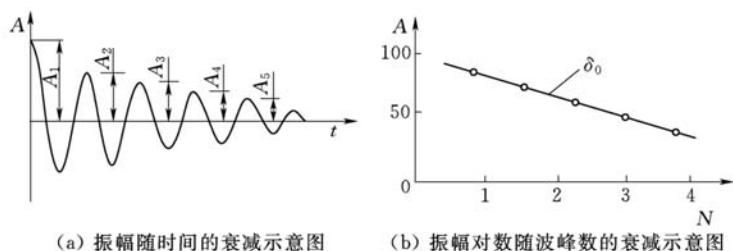


图 6-5 自由振动振幅衰减曲线示意图

6.13 空心圆柱动扭剪试验

6.13.1 空心圆柱动扭剪试验可以更好地模拟多向应力和主应力轴旋转等复杂应力路径，因此可以针对海洋饱和土开展模拟波浪荷载、设备动力荷载、地震作用的循环动力试验，也可以用于静力试验以测定土体的应力-应变-强度特性、孔隙水压力变化特性，研究原状土的结构性和各向异性。

空心圆柱试样薄壁单元体受力状态如图 6-6 所示。

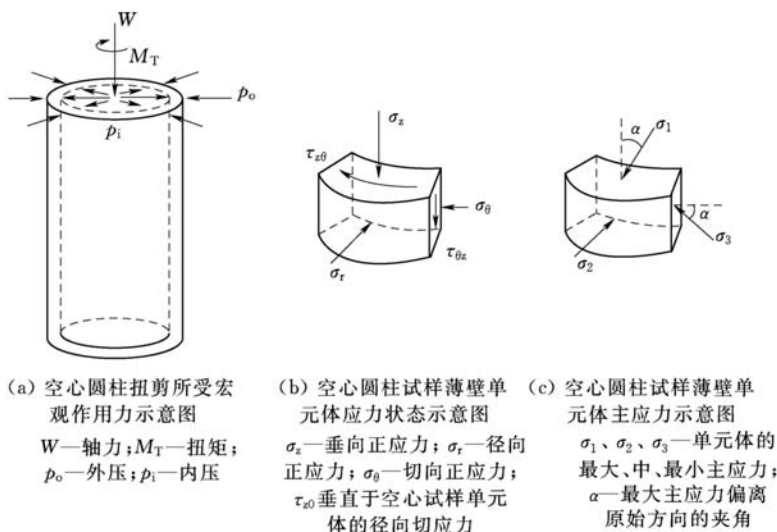


图 6-6 空心圆柱试样薄壁单元体受力状态示意图

6.13.2 本条是空心圆柱动扭剪试验仪器设备的规定。

1 空心圆柱扭剪仪能够独立控制轴力、扭矩以及内、外围压，实现了土单元体的大、小主应力在垂直于径向的平面内连续旋转，试样径向主应力为中主应力。其所具备的应力坐标系包含大、中、小主应力以及大（小）主应力旋转角度四个应力参数，从而达到模拟平面主应力轴旋转应力路径的要求，为研究考虑主应力轴旋转下土体的本构关系、动强度等特性提供试验基础。以国内高校和科研院所的空心圆柱扭剪仪为示例：主要由压力室及伺服主机系统（包含压力室、平衡锤、轴力/扭矩传感器、轴向和旋转双驱动基座、数据采集和信号调节器、内置编码控制器）、水压伺服控制加载系统（3个独立的数字式压力/体积控制器）、模拟信号与数字信号控制及转换系统和计算机控制系统（采用专用模块化软件，包含数据采集的 Kernel 模块、标准静态和低频循环控制模块、主应力轴旋转应力路径模块、动态控制模块）组成。一般实验室所用空心圆柱扭剪仪的主要传感器具备的性能指标可参考表 6-3。

表 6-3 空心圆柱扭剪仪主要传感器的性能指标

名 称	量 程	精 度
轴力/扭矩耦合传感器	12kN/200N·m	全量程 0.1%
轴向位移传感器	-40mm~40mm	0.001mm
扭剪位移传感器	转角无限制	0.1°
压力传感器	2MPa	全量程 0.1%
体变传感器	1000cm ³	1mm ³
局部外壁变形传感器	0.9mm~6.0mm	全量程 0.1%
局部内壁变形传感器	-5mm~5mm	全量程 0.1%

2 关于试验中制备土样的部分设备。供参考的一种扰动黏性土空心圆柱试样真空负压制备装置（图 6-7）。其中的制样筒尺寸，需根据试验所用空心圆柱扭剪仪标准试样的尺寸来设计。

制得的空心圆柱试样是初步成型待精削的空心试样，其外径、内径应分别大于、小于试验所用空心圆柱扭剪仪标准试样外径、内径 3mm~5mm，制得的空心圆柱试样高度不能小于试验所用空心圆柱扭剪仪标准试样高度 2cm，以保证初步成型待精削的空心试样在保存及加工过程中出现局部受损或偏差时可以修复。

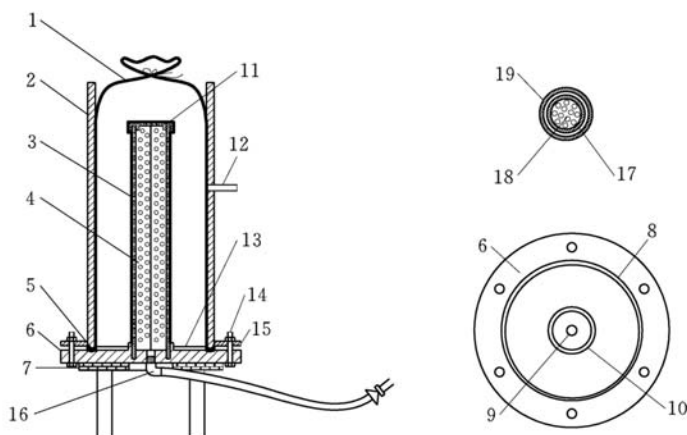


图 6-7 扰动黏性土空心圆柱试样真空负压制备装置示意图

- 1—乳胶膜；2—制样筒；3—滤纸；4—三瓣排水体；5—橡胶密封垫圈；
6—排水底座；7—三脚支架；8—凹槽；9—排水孔；10—插槽圆；
11—配套顶盖；12—通气孔；13—土工布；14—螺栓；15—法兰盘；16—气动阀门；17—内环；18—透水圆孔；19—外环

供参考的一种黏性土空心圆柱试样切样台（图 6-8）。目前常用的黏性土空心圆柱试样切样台分为自动控制试样旋转和手动控制试样旋转两种，本规程以手动控制试样旋转的黏性土空心圆柱试样切样台为例。采用朝上顶土钻芯，或朝下顶土钻芯。图 6-8（b）示意的是朝下顶土钻芯。

供参考的一种黏性土空心圆柱试样内壁切削器（图 6-9）。黏性土空心圆柱试样内壁切削器外部具有护筒，其上端设有刃口，下端通过护筒底托-护筒定位螺栓和护筒-护筒底托连接螺栓

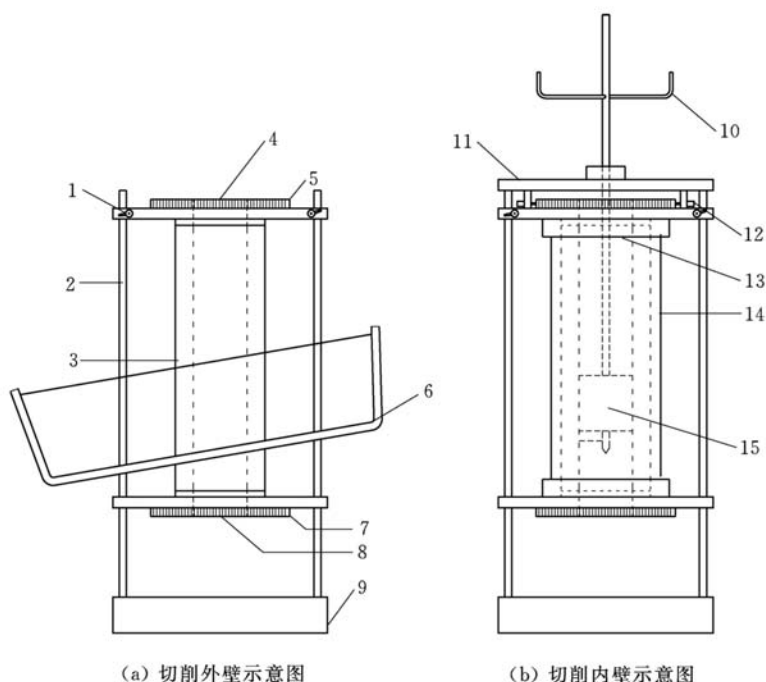


图 6-8 黏性土空心圆柱试样切样台示意图

- 1—固定螺栓；2—定位钢柱；3—空心圆柱试样；4—上定位孔；5—上圆盘；6—钢丝锯；7—下圆盘；8—下定位孔；9—底座；10—旋转扳手；11—内壁切削器对准器；12—圆盘固定螺栓；13—卡位护环；14—外壁对开圆模；15—黏性土空心圆柱试样内壁切削器

与拆卸式护筒底托相连接，拆卸式护筒底托上方设有拆卸式盛土托，拆卸式盛土托上设有释压孔，护筒中间设有主钻头，主钻头由螺旋钻头、内缘刀锋组成，并与钻杆连接，钻杆穿过拆卸式盛土托、拆卸式护筒底托并分别通过盛土托—钻杆定位螺丝、护筒底托—钻杆定位螺丝固定，拆卸式刀锋片由外缘刀锋、水平刀锋组成，并通过刀锋定位螺丝与主钻头刚性连接。

供参考的一种扰动无黏性土空心圆柱试样成样装置（图 6 -

10)。其采用的是四瓣式制样内钢模和三瓣式制样外钢模。

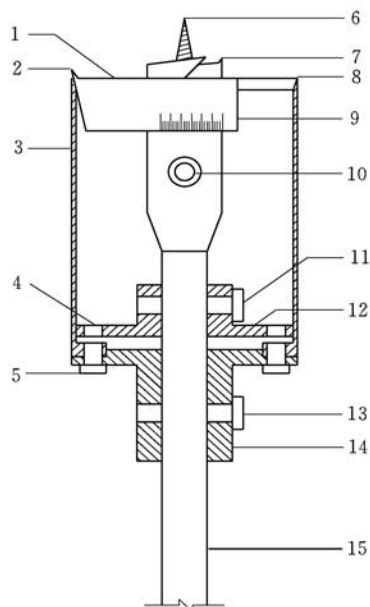


图 6-9 黏性土空心圆柱试样内壁切削器示意图

- 1—水平刀锋；2—外缘刀锋；3—护筒；4—释压孔；5—底托固定螺栓；6—螺旋钻头；7—内缘刀锋；8—护筒刀口；9—拆卸式刀锋片；10—刀锋定位螺栓；11—盛土托-钻杆定位螺栓；12—拆卸式盛土托；13—底托-钻杆定位螺栓；14—拆卸式护筒底托；15—钻杆

供参考的一种扰动无黏性土空心圆柱试样击实器（图 6-11）。包括带有全长 23.5cm 导杆的击实底座、可以拼装拆卸的击实筒、高度 8cm 的击实锤，击锤的最大落距是 15.5cm。

6.13.3 目前比较常见的空心圆柱试样尺寸为：高 200mm，外径 100mm，内径 60mm。

6.13.4 安装顶盖时可以利用顶盖定位器，所需结构如图 6-12 所示。

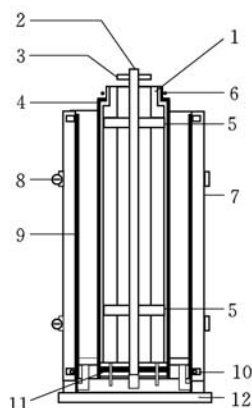


图 6-10 扰动无黏性土空心圆柱试样成样装置示意图

- 1—制样内钢模；2—中心定位杆；3—手杆；4—内膜；5—内膜内撑；
6—内钢模定位内撑；7—制样外钢模；8—外钢模外箍；9—外膜；
10—外橡皮膜用 O 形橡皮圈；11—内膜固定器；12—基座

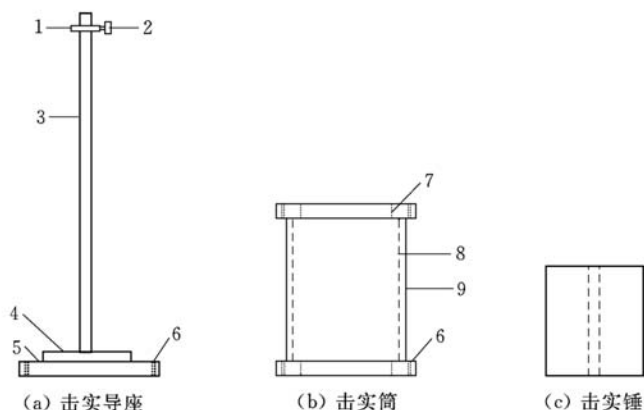


图 6-11 扰动无黏性土空心圆柱试样击实器示意图

- 1—导座定位片；2—定位片螺栓；3—击实导座导杆；4—击实导座
击实锤连接片；5—击实导座击实筒连接片；6—螺孔；7—击实筒
上下边缘内壁；8—击实筒筒内壁；9—击实筒筒外壁

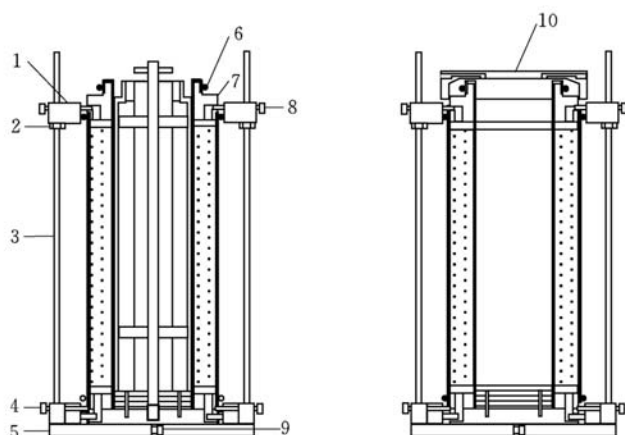


图 6-12 安装顶盖定位器所需结构细部示意图

1—对开式试样顶盖定位器的上部卡位器；2—定位卡片；3—定位杆；
4—下定位螺丝；5—对开式试样顶盖定位器的下部卡位器；6—O 形
橡皮圈；7—试样顶盖；8—上定位螺丝；9—螺丝；10—试样帽盖

顶盖定位器的安装步骤一般为：

(1) 将对开式试样顶盖定位器的下部卡位器夹住试样基座，用螺丝定位合拢，同时旋紧下定位螺丝。

(2) 将试样顶盖穿过内膜，避免与试样顶部接触，同时沿着定位杆，旋动定位卡片，使对开式试样顶盖定位器的上部卡位器移动到试样顶盖处，旋转上定位螺丝，将上部卡位器与试样顶盖连接。

(3) 将试样内膜翻出，用 O 形橡皮圈固定在试样的帽盖上，拆除试样内撑等部件并安装试样顶盖。

(4) 盖上试样帽盖，并用螺丝将其与顶盖锁定。

6.13.6 本条提出的加载模式是基于前人对波浪荷载问题的研究，波浪荷载在海床内土单元体中引起的动应力路径具有最大与最小主应力轴连续 180° 旋转以及大小主应力差值 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 不

变的两个特点。本试验在加载过程中的注意事项：

本试验所述的“当最大与最小主应力差值不变的主应力轴循环旋转应力路径”是国际上模拟波浪荷载最接近的应力路径之一，加载过程通常采用输入轴力和扭矩耦合加载波形的方法实现控制。空心圆柱动扭剪试验可以实现的加载应力路径包括：模拟地震作用的“最大主应力方向角不变的定向剪切路径”[图 6-13 (a)]，模拟波浪荷载的“最大与最小主应力差值不变的主应力轴循环旋转路径”[图 6-13 (b)]，模拟交通荷载的“主应力方向连续旋转与剪应力幅值耦合变化的心形线应力路径”[图 6-13 (c)]等。其他复杂应力路径的加载步骤大致相同，具体加载波形、轴力加载函数、扭矩加载函数等可以根据本规程附录 D 推导得到。

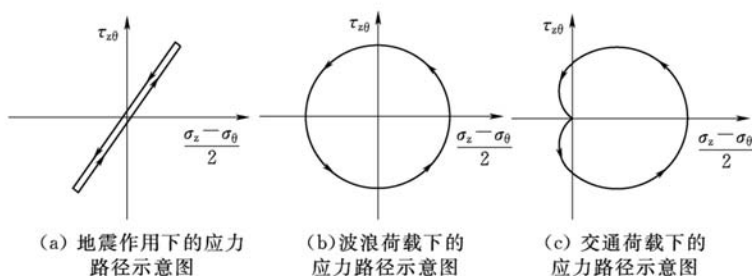


图 6-13 不同动力荷载作用下应力路径特性示意图

6.13.7 本条规定了空心圆柱动扭剪试验的步骤。

1 利用内压、反压控制器进行排气的步骤一般为：

(1) 打开各排水控制阀，并检查各排水口是否漏水，若出现渗漏应拧紧连接排水口与管线的螺母。

(2) 分别设置一个较小的内压和反压值进行排气，施加的压力值一般为 6kPa。

2 对试样进行等压固结时，轴力设定为零；对试样进行偏压固结时，轴力设定为所需值。

后续加载过程中的排水条件需根据实际工程问题中土体所受的排水条件来确定，动力试验多数在不排水条件下进行。

4 本款所述的“最大与最小主应力差值不变的主应力轴循环旋转应力路径”是模拟波浪荷载的应力路径。

6.13.8 空心圆柱动扭剪试验的动强度规定为一定的振次下，试样产生某一指定破坏应变或满足某一破坏标准所需的广义剪应力。确定空心圆柱动扭剪试验的动强度时需注意，由于空心圆柱动扭剪试验的加载过程可模拟多向应力和主应力轴旋转等复杂应力路径，因此在研究土单元体所受应力大小时需考虑多种应力的组合结果。

试样的破坏标准，常用应变标准、孔隙水压力标准或有效应力的极限平衡标准等。土体在复杂应力路径下，除了竖向变形还会产生扭剪变形，因此选取破坏标准时需考虑轴向应变、切向应变、扭剪应变等多种应变的耦合作用。

空心圆柱动扭剪试验可加载的波形较多，应力路径也较为复杂，在进行动强度测定的过程中，需要确定统一的破坏标准，需针对某一特定加载波形或应力路径下的土体进行比较分析。例如，最大、最小主应力恒定的主应力轴旋转路径试下所测定的动强度，与振动三轴应力路径下所测定的动强度，其大小不能直接进行比较。

6.13.10 对于试验得到的任何一条动强度曲线，均需注明它对应的破坏标准、土性条件（如密度、含水率和结构）和初始静应力状态（如固结应力、固结应力比、初始应力比等）。

6.14 微型十字板剪切试验

6.14.2 十字板尺寸采用了美国标准 ASTM D4648/D4648M - 13 *Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine -Grained Clayey Soil*（美国材料与试验协会-饱和细粒黏性土的微型十字板剪切试验）。

6.14.3 试验土样平整、大小合适，且土样不能扰动。根据初步判断的土的状态选择合适的微型十字板板头压入土体至板头深度，压入过程及剪切试验时需保持匀速。土体剪切试验破坏后，需避免触碰微型十字板指针，以免影响剪切试验强度。根据美国标准 ASTM，微型十字板剪切试验是在被测土样表面将微型十字板头压入土体至不低于板头高度 2 倍的深度，以一定速率扭转，量测土体破坏时土的不排水抗剪强度。微型十字板每测一次土体的抗剪强度后，需对板头进行清洗，清除板头上残余的土，以免影响下次测试时的精度。

本条第 4 款中两种不同的扭矩测量对应的扭转剪切速率不同，这是因为采用刚性扭矩传感器的微型十字板在剪切过程为应变式控制，而扭转弹簧的微型十字板在剪切过程中介于应变控制和应力控制之间，应变式破坏的结果显示的剪切速率大于应力式，因此本规程针对不同扭矩测量装置规定了不同的扭转剪切速率范围。

6.14.4 根据工程实际需要，微型十字板剪切试验可以间隔 0.5m、1m 等进行测试，通过大量数据测定每层土的不排水抗剪强度，减少试验的偶然误差和人为因素的影响。绘制的单孔微型十字板剪切试验土的不排水抗剪强度随深度的变化曲线，以了解土体随深度的变化关系、土体的应力历史等。

6.15 袖珍贯入仪试验

6.15.2 袖珍贯入仪读数方式分机械式和电子数显式两种类型，其测力方式均通过探头贯入土体一定深度测定土体的贯入阻力。机械式袖珍贯入仪在使用过程中可能存在一定的读数误差。对于电子式，由于采用了数字自动显示技术，代替了机械刻度，消除了视觉误差和人为误差，精度较高。

6.15.3 贯入时，要求避开有虫孔或裂隙的部位以及试样中的硬质包含物，否则，影响测试结果。试验时，贯入速度的快慢是否

匀速，对贯入阻力有一定影响，因此，在试验过程中，施力均匀，总贯入时间一般为 10s。

6.15.5 根据求得的贯入阻力 (P_t) 以及相应土类，《袖珍贯入仪试验规程》CECS 54: 93 分别按表 6-4~表 6-11 确定土的液性指数 (I_L) 和地基承载力基本值 (f_0)，其中贯入阻力的单位为 100kPa，地基承载力基本值的单位为 kPa。

表 6-4 黏土贯入阻力 (P_{ta}) 与液性指数 (I_L) 对照表

$P_{ta}(100\text{kPa})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	6.0
I_L	1.22	1.03	0.91	0.83	0.77	0.72	0.64	0.53
$P_{ta}(100\text{kPa})$	8.0	10.0	12.0	14.0	17.0	20.0	22.0	
I_L	0.45	0.39	0.33	0.29	0.23	0.19	0.15	

表 6-5 黏土贯入阻力 (P_{tc}) 与液性指数 (I_L) 对照表

$P_{tc}(100\text{kPa})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	6.0	8.0
I_L	0.90	0.75	0.67	0.61	0.57	0.53	0.47	0.39	0.33
$P_{tc}(100\text{kPa})$	10.0	12.0	14.0	16.0	19.0	22.0	26.0	30.0	32.0
I_L	0.26	0.24	0.21	0.18	0.15	0.14	0.08	0.04	<0

表 6-6 粉质黏土贯入阻力 (P_{ta}) 与液性指数 (I_L) 对照表

$P_{ta}(100\text{kPa})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
I_L	1.37	1.18	1.06	0.98	0.92	0.87	0.79
$P_{ta}(100\text{kPa})$	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	17.0	22.0
I_L	0.68	0.59	0.53	0.47	0.42	0.38	0.34

表 6-7 粉质黏土贯入阻力 (P_{tc}) 与液性指数 (I_L) 对照表

$P_{tc}(100\text{kPa})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	6.0	8.0
I_L	1.21	1.03	0.92	0.85	0.79	0.74	0.67	0.56	0.49
$P_{tc}(100\text{kPa})$	10.0	12.0	14.0	16.0	19.0	22.0	26.0	30.0	32.0
I_L	0.43	0.37	0.32	0.27	0.22	0.17	0.12	0.07	<0

表 6-8 淤泥及淤泥质土贯入阻力 (P_{tb}) 与液性指数 (I_L) 对照表

$P_{tb}(100kPa)$	0.5	1.0	1.5	2.0
I_L	1.31	1.20	1.10	1.01

表 6-9 黏土及粉质黏土贯入阻力 (P_{ta}) 与地基承载力基本值 (f_{0t}) 对照表

$P_{ta}(100kPa)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
f_{0t}	60	80	100	120	135	145	155	165	175
$P_{ta}(100kPa)$	7.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	20.0	22.0	
f_{0t}	185	195	215	225	235	240	250	255	

表 6-10 黏土及粉质黏土贯入阻力 (P_{tc}) 与地基承载力基本值 (f_{0t}) 对照表

$P_{tc}(100kPa)$	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
f_{0t}	65	80	105	120	135	150	165	180	195	210	220	230
$P_{tc}(100kPa)$	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0	32.0	
f_{0t}	240	260	275	285	295	305	315	325	335	345	(355)	

表 6-11 淤泥及淤泥质土贯入阻力 (P_{tb}) 与地基承载力基本值 (f_{0t}) 对照表

$P_{tb}(100kPa)$	0.5	1.0	2.0	4.0
f_{0t}	55	70	80	(95)

注：1. 为了表示通过袖珍贯入仪测得的基本承载力与其他方法测得的地基基本承载力有所区别，故在 f_0 之后加角标 t ；

2. 表中带 () 的 f_{0t} 仅供内插。

7 原位测试

7.1 静力触探试验

7.1.3 海床式和海床吸力式静力触探降低了风浪、潮流、水深等的影响，使用水深一般不受限制，但受反力和贯入力影响，贯入深度受到一定限制。当表层土质为软土时，可能造成表层软土的扰动；当表层土质为松散的砂土层时，可能造成表层土的压密。井下式静力触探钻探和静探交替进行，贯入深度一般不受限制，但需带动态定位的大型勘探船，采用固定平台时适用水深受到限制。固定平台式静力触探在自升式平台或支架式平台上进行，其使用水深受到限制。当风力大于 6 级或水深大于 5m 时，船载式平台晃动比较厉害，影响静力触探正常进行。

7.1.5 国际标准 BS EN ISO 19901-8: 2015 *Petroleum and natural gas industries—Specific requirements for offshore structures—Part 8: Marine soil investigations*（石油天然气行业标准 离岸结构物 第 8 部分：海洋土勘察）规定静力触探探头标定每年至少一次。现行行业标准《静力触探试验规程》YS 5223 和《静力触探技术标准》CECS 04 均规定静力触探探头标定的有效期为三个月，有效期内发现异常需重新标定。

7.1.7 目前国内还未有相关标准对静力触探试验探头进行等级评定，根据欧洲标准 EN ISO 22467-1 对静力触探探头进行等级评定（表 7-1）。

表 7-1 中零漂差值指测试前后零漂值的差，深度是指深度测量的最大允许误差，包括深度编码器的测量精度和其他误差，如开始记录延时等误差。

通过比较静力触探试验前后探头零漂的差值或百分比，分析

表 7-1 静力触探探头等级评定标准 (EN ISO 22467-1)

等级	参数	零漂差值	零漂差值与试验前零漂值的比值 (%)	测量传感器最大间距 (mm)
1	锥尖阻力	35kPa	5	20
	侧壁摩擦力	5kPa	10	
	孔隙水压力	10kPa	2	
	倾斜	2°		
	深度	0.1m	1	
2	锥尖阻力	100kPa	5	20
	侧壁摩擦力	15kPa	15	
	孔隙水压力	25kPa	3	
	倾斜	2°		
	深度	0.1m	1	
3	锥尖阻力	200kPa	5	50
	侧壁摩擦力	25kPa	15	
	孔隙水压力	50kPa	5	
	倾斜	5°		
	深度	0.2m	2	
4	锥尖阻力	500kPa	5	50
	侧壁摩擦力	50kPa	20	
	孔隙水压力			
	倾斜			
	深度	0.2m	2	

探头及测试数据的可靠性。探头等级分为 1~4 级, 1 级为最好, 4 级或大于 4 级为最差。试验探头为较差时应分析原因并对测试数据进行校正。

7.1.8 现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 和现行行业标准《静力触探技术标准》CECS 04 中, 摩阻比定义为侧壁

摩阻力 f_s 与测得的锥尖阻力 q_c 的比值,挪威土工所同时采用测得的锥尖阻力 q_c 和修正锥尖阻力 q_t 两种方法计算摩阻比。对土体参数进行估算时,一般采用后者。

7.1.11~7.1.12 以国内研制的海床吸力式静力触探仪为例,采用3个呈等边三角形布置的吸力桶,吸力桶内设置反滤层,用于抽真空过程中过滤桶内的土颗粒。垂直高度调节液压油缸与吸力桶采用球形铰接,用于吸力桶安装就位后水下静力触探设备的调平,保证静力触探过程中探杆竖直贯入水下土层。垂直高度调节液压油缸通过连接支架与反力支撑子系统的工作平台连接,真空泵通过工作平台下的转换容器连接吸力桶。

7.1.13~7.1.14 井下静力触探试验是一种钻探和静力触探试验相结合的静力触探试验设备,可以借助钻探设备在任一深度进行静力触探试验,获取所需的土质资料。井下式静力触探试验测试系统的特点是探头从钻孔的底部贯入到土层中,通常每次的最大贯入深度为3m,一般3m为一个冲程。井下式静力触探试验可以同时测量时间、深度、锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力。

7.1.15~7.1.16 固定平台式静力触探利用海上自升式平台或支架式平台作为反力装置和载体,可以消除风浪、潮流等影响,试验成果精度高,数据可靠。作业场区水深不能大于固定平台的使用水深,并且对海床地基承载力有一定要求。

7.2 T形触探试验

7.2.1~7.2.2 T形触探试验适用于不排水抗剪强度低于20kPa的软黏土,且不适用于海底表层深度1m以内土的强度测定。本试验方法参考国际石油天然气行业标准 BS EN ISO 19901-8 *Petroleum and naturalgas industries—Specific requirements for offshore structures—Part 8: Marine soil investigations* 石油天然气行业标准 离岸结构物 第8部分:海洋土勘察)和挪威标准 *Marine soil investigations* (G-001, Rev.2, 海洋岩土工

程勘察)制定。T形触探仪可与静力触探仪的荷重传感器相连,压入土中,通过测量贯入过程中的阻力,获得软黏土不排水抗剪强度的连续剖面线。标准T形触探仪的探头投影面积为 10cm^2 静力触探探头的10倍。作为一种代表性的全流动(full flow)贯入仪,T形触探仪具有如下优点:较少受到上覆土压力与土的刚度的影响;投影面积较大,可以得到更为精确的不排水抗剪强度值;贯入阻力与软土强度之间的关系具有比较严格的理论解等优点。

7.2.6 根据西澳大学和挪威土工所的研究成果,软黏土在扰动状态的阻力系数 $N_{T\text{-bar}}$ 取值高于天然状态。对于灵敏度低于8的软黏土,表7-2列出了采用不同试验方法得到的 $N_{T\text{-bar}}$ 建议值。

表 7-2 阻力系数 $N_{T\text{-bar}}$ 建议值表

土的状态	T-bar 试验方法	抗剪强度试验方法	多场地综合数据		几内亚湾数据	
			均值	范围	均值	范围
原位状态	单次贯入-上拔	三轴固结不排水试验	10.5	8.5~12.5	10.5	8.5~12.5
原位状态	单次贯入-上拔	三轴压缩、三轴拉伸和单剪试验均值	12.0	10.0~14.0	12.0	10.0~14.0

7.3 球形触探试验

7.3.1~7.3.2 球形触探试验适用于不排水抗剪强度低于 20kPa 的软黏土,且不适用于海底表层深度 1m 以内土的强度测定。本试验方法参考国际石油天然气行业标准 BS EN ISO 19901-8 *Petroleum and natural gas industries—Specific requirements for offshore structures—Part 8: Marine soil investigations* 石油天然气行业标准 离岸结构物 第8部分:海洋土勘察)和挪威标准 G-001, Rev.2 *Marine soil investigations* (海洋岩土工程勘察)制定。球形触探仪可与静力触探仪的荷重传感器相连,压

入土中，通过测量贯入过程中的阻力，获得软黏土不排水抗剪强度的连续剖面线。标准球形贯入仪探头的投影面积为 10cm^2 静力触探探头的 10 倍。相比 T 形触探仪，球形触探仪还具有贯入过程不会受弯的优点。

7.4 十字板剪切试验

7.4.1 十字板剪切试验大部分国家规定适用于灵敏度 S_t 小于或等于 10 的饱和软黏土，测得的抗剪强度相当于内摩擦角 φ_u 等于零时的黏聚力值，即不排水抗剪强度。

7.4.2 海上作业受风浪影响，十字板试验难以实施，当采用固定式平台或者带动态定位并可以消除波浪的浮式平台，以及沉入海底的海床式静探仪时，可以不受风浪影响，十字板试验可以顺利实施。海床式静探仪沉入海底，依靠自身重力作为反力，可以采用孔隙水压力静力触探探头、十字板板头、剪切波等测试装置分别开展相应测试。

7.4.4 随着我国试验设备标准化的发展，十字板剪切仪从产品生产到使用已有相关规程和规范，《岩土工程仪器基本参数及通用技术条件》GB/T 15406 和《土工试验仪器 剪切仪 第 2 部分：现场十字板剪切仪》GB/T 4934.2 都作出了有关规定，仪器设备的相关技术要求参照执行即可。

7.4.5 本条第 4 款关于剪切速率。十字板剪切仪进行了剪切速率的对比试验，试验结果表明：试验的速率为 $1^\circ/10\text{s}$ 和 $2^\circ/10\text{s}$ 两组强度曲线变化很有规律，剪切速率大，抗剪强度也大；剪切速率小，抗剪强度也小。因此，剪切速率应控制在适当范围内。为了统一，并与现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 一致，本规程规定剪切速率为 $(1^\circ\sim 2^\circ)/10\text{s}$ 。

7.5 标准贯入试验

7.5.1 由于海上波浪、涌浪等影响，在海上浮式平台上进行标

准贯入试验时，试验数据可能产生较大误差。固定式平台由于不受波浪、涌浪的影响，数据成果较为可靠。

7.5.2 依据现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的相关要求，表 7.5.2 中的刃口单刃厚度统一为 1.6mm。

7.5.3 标准贯入试验测试时，贯入度量测基面一般选择套管口或平台面，海域钻孔采用浮式平台时，受波浪影响平台是晃动的，若套管与平台固定，则套管口也随平台一起晃动，这种情况下，将套管口或平台面作为贯入度量测基面是不妥当的，需采取措施避免这一因素影响。海域钻探采用浮式平台时，风浪大时一般不做标准贯入试验。

7.6 动力触探试验

7.6.2 重型动力触探试验是应用最广的一种，其规格与国际通用标准一致；超重型动力触探规格与国际接近。

7.6.3 本条操作要点主要考虑了影响试验成果的因素，其中锤击能量和触探杆与岩土间的侧壁摩阻力是主要因素，锤击速度是次要因素。

7.6.4 根据动力触探试验成果进行土层划分时注意超前和滞后现象，上为硬土层下为软土层，超前约为 0.5m~0.7m，滞后约为 0.2m；上为软土层下为硬土层，超前约为 0.1m~0.2m，滞后约为 0.3m~0.5m。超前滞后范围内值、临界深度以内的值均不反映真实土性，故不参加统计。

7.7 旁压试验

7.7.1 由于自钻式旁压仪价格昂贵，尚未广泛使用，适用岩土层较为单一，一般用于黏性土，海洋岩土层较为复杂，因此建议采用预钻式旁压仪。

7.7.3 本条规定了预钻式旁压仪的设备要求。旁压器一般为圆柱形骨架，内、外膜套为密封的橡胶膜。预钻式旁压器分上、

中、下三腔，中腔为测试腔，上、下腔为辅助腔，上、下腔用金属管连通，与中腔严密隔离。对现有旁压器有三种保护措施：
①在橡胶膜外可以加装一层可扩张的金属保护套作为铠装保护；
②在外膜内掺杂金属丝形成钢丝膜套；③在旁压器外加装开缝套管。

一般国产旁压仪压力量程为 4MPa~6MPa，常规梅那旁压仪量程为 10MPa，近年来新出产的高压旁压仪为单腔式，压力量程可以达到 25MPa，主要用于测定软岩的力学参数。

7.7.4 本条规定了旁压试验的步骤和要求。

1~2 成孔质量好坏是预钻式旁压试验成败的关键。根据勘察实践总结的经验，成孔质量影响旁压曲线的形态。图 7-1 中的 a、c、d 型曲线都是反常的旁压曲线。a 线反映钻孔直径太小或有缩孔现象，旁压器被强行压入钻孔中，试验前，孔壁已受到挤压，故旁压曲线前段消失，找不到 p_0 值和 V_0 值。c 线的特点是在曲线上有一段很长的 V_0 值，说明孔径太大，旁压器的膨胀量相当一部分是由于橡胶膜与孔壁之间间隙产生的。d 线反映成孔过程中孔壁土体被严重扰动，当加压时，扰动土层被压缩，占

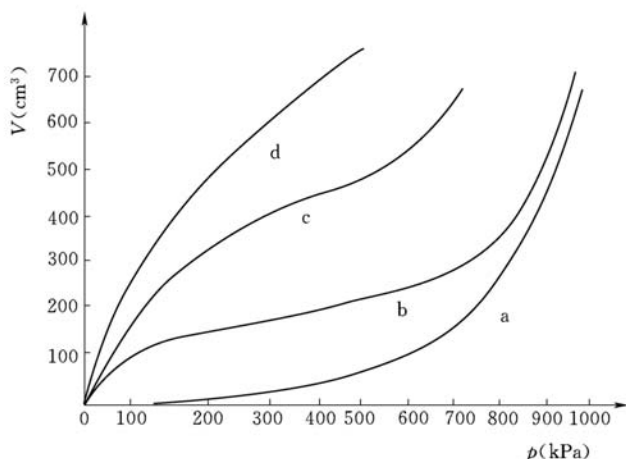


图 7-1 成孔质量对旁压曲线的影响

据较多的体变量，因而，达不到试验要求就被迫停止试验。

孔壁扰动是试验中孔壁出现压缩层（千层饼扰动带）的根本原因，压缩层的存在影响了成果的判释和应用，尤其对旁压模量 E_m 值影响更大。

国家现行标准《土工试验规程》SL 237 规定试验钻孔孔径宜大于旁压器外径 2mm~6mm，现行国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123 中规定为 2mm~10mm，而现行行业标准《旁压试验规程》YS 5224 中规定为 2mm~8mm。为保障海上试验成果的可靠性，从工程实际出发，认为试验钻孔孔径大于旁压器外径 2mm~6mm 比较合适。

4 关于旁压试验的布点，需在了解地层剖面的基础上进行，以便能合理地在有代表性的位置上布置试验。布置时要保证旁压器的量测腔在同一土层中。关于旁压试验应力的影响范围，根据实践相邻试验点的相互影响，试验点的垂直和水平距离一般不小于 1m。

7 关于梅纳旁压仪通过压差调节控制旁压器在测点深度处的保护腔体压力，使测试腔与保护腔的压差恒定，以达到消除端部效应的作用。PY 型旁压仪仅考虑了旁压器与中腔水位的持平，以计算静水压力值，但测试腔与保护腔的压力差随深度变化，端部效应消除的效果受到影响。

10 每级加载压力的选择和设计是很重要的，若每级加载压力选择不当，不但延长了试验时间，而且在旁压曲线上不易获得 p_0 和 p_t 的特征点。采用了通用的每级加载压力，一般按预估极限压力的 1/14~1/10 的等级加压，同时考虑到按土的性状划分等级更符合实际情况。为了易于获得 p_0 值和 p_t 值，采用了在临塑压力前后不同的每级加载压力。

11 加载速率 1min 主要用于粉土、砂、砾石等土类的旁压试验，加载速率 3min 主要用于黏性土。

12 旁压试验终止试验条件包括：①加载压力接近或达到极

限压力（预计最大压力）。量测腔的扩张体积相当于量测腔的固有体积，避免弹性膜破裂。②对国产 PY2-A 型旁压仪，因量水管的断面积为 15.28cm^2 ，所以，规定量水管水位下降值 36cm ，不能超过 40cm 时，即终止试验。③法国 GA 型旁压仪规定，当蠕变变形等于或大于 50cm^3 或量筒读数大于 600cm^3 时应终止试验。

7.7.5 本条对旁压试验成果的整理进行了要求。

1 静水压力的计算考虑了以下两种条件，参见图 7-2。

(1) 无地下水时：

$$p_w = (h_0 + z)\gamma_w \quad (7-1)$$

(2) 有地下水时：

$$p_w = (h_0 + h_w)\gamma_w \quad (7-2)$$

式中： h_0 ——量管水面离地面孔口高度（cm）；

z ——地面至旁压器中腔（量测腔）中心点的距离（cm）；

h_w ——地下水位离孔口的距离（cm）；

γ_w ——水的容重（ kN/m^3 ）。

3 旁压试验的压力一律需要经过约束力和水头压力的校正，需注意地下水位记录数据。其变形需要经过仪器综合变形的校正，避免用现场直接读数绘制旁压曲线，如用现场直接读数绘制曲线时，所求得特征值也需要要经过校正后方可使用。

4 根据梅纳尔的理论， p_0 、 p_f 值是蠕变压力曲线（以 60s 与 30s 间隔内体积变化值为该级压力下蠕变值划出的 $P-V_{60''-30''}$ 曲线）上的第一和第二个拐点。但是画该曲线较麻烦。同时，由于钻孔扰动，缩孔等影响，按该法求得的 p_{om} 值比实际的原位初始侧向（水平）应力大，因此，在本规程中采用了简捷求 p_0 的方法。

至于 p_f 值，相对应 $p-V$ 旁压曲线上直线终点对应的应力值。当该点难以直观确定时，可用蠕变曲线第二拐点对应的压力值作为 p_f 值。

关于求取 p_L 值, 根据梅纳尔理论 p_L 值是当 $p-V$ 旁压曲线通过临塑压力后, 趋于铅直, 即与纵坐标平行的渐近线相对应的压力值。相当于最大体积增量 $V_L (=V_e + 2V_0)$ 时对应的压力值。国外求取 p_L 值的方法较多, 如双对数法、倒数曲线法和相对体积法等。近年来, 还发展了一些数解法。采用标准中采用了梅纳尔的倒数曲线法。该法是把临

塑压力 p_i 以后曲线部分各点的体积 V (或 S) 取倒数 $1/V$ ($1/S$), 作 $p-1/V$ 关系曲线 (近似直线), 在直线上取 $\frac{1}{2V_e + V_0}$ 所对应的压力值即为极限压力 p_L 。

在假定孔穴周围土体为理想弹塑性材料时, 极限压力 p_i 与原位土的不排水抗剪强度 c_u 的关系如下:

$$p_L = p_0 + c_u \left[1 + \ln \frac{E_u}{2(1+\mu)c_u} \right] \quad (7-3)$$

式中: E_u ——土的不排水变形模量 (kPa);

μ ——土的泊松比。

5 旁压试验采用“快速法”, 相当于不排水条件, 根据弹性理论, 推导出了旁压模量 E_m 。由于影响旁压模量的因素较多, 各类土的载荷试验变形模量 E_0 与旁压模量 E_m , 室内压缩模量 E_s 与旁压模量 E_m 之间除个别地区外, 目前还无法建立完整的相关关系。因此, 在本规程中没有提出相关关系式。建议各地区可根据具体情况采用公式 $E_m = 2(1+\mu)(V_e + V_m) \frac{\Delta p}{\Delta V}$, 或建立本

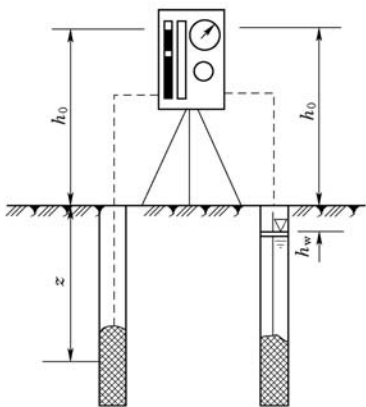


图 7-2 静水压力计算示意图

地区的旁压模量计算公式。

6 地基承载力基本值 f_{0k} 一般采用下列公式计算：

(1) 采用临塑压力法时， f_{0k} 可以按下列公式计算：

$$f_{0k} = p_f - p_0 \quad (7-4)$$

式中： p_0 ——原位水平土压力 (kPa)。

(2) 采用极限压力法时， f_{0k} 可以按下列公式计算：

$$f_{0k} = (p_L - p_0) / F_a \quad (7-5)$$

式中： F_a ——安全系数。

不排水抗剪强度一般按下式计算：

$$c_u = p_f - p_0 \quad (7-6)$$

静止侧压力系数一般按下式估算：

$$K_0 = \frac{p_0}{z\gamma} \quad (7-7)$$

式中： K_0 ——静止侧压力系数；

γ ——土的重度 (kN/m^3)；

z ——旁压器中心点至地面的土柱高度 (m)。

7.8 扁铲侧胀试验

7.8.2 在有使用经验的地区，使用扁铲侧胀试验可以划分土层并定名，确定静止侧压力系数、超固结比、不排水抗剪强度、变形参数乃至判定地基液化可能性等。

7.8.6 控制装置主要为控制箱，内装气压控制管路、控制电路及各种指示开关，主要作用是控制实验的压力和指示膜片三个特定位置时的压力，并传送膜片达到特定位移量时的信号。

膜片膨胀的三个特殊位置的状态如下：

(1) 膨胀量小于 0.05mm 时为“压偏”状态，蜂鸣器和检流计接通；

(2) 膨胀量大于等于 0.05mm、小于 1.10mm 时为“膨胀”状态，蜂鸣器和检流计断开；

(3) 膨胀量大于等于 1.10mm 时为“完全膨胀”状态，蜂鸣器和检流计接通。

7.8.7 为确保试验数据的真实性，规定试验前后对扁铲探头膜片进行标定，一般采用下列标定步骤：①用率定气压计对侧胀板头抽真空，使膜片从自然位置移向基座，蜂鸣器鸣响后缓慢解除真空，蜂鸣器响声停止瞬间读取 ΔA 值；②用率定气压计对侧胀板头施加正气压，待蜂鸣器鸣响瞬间读取 ΔB 值；③重复 3 次～4 次上述操作，记录 ΔA 及 ΔB 的平均值。 ΔA 值范围一般为 5kPa～25kPa， ΔB 值范围一般为 10kPa～110kPa；④标定值不在适用范围内的新膜片需要事先进行老化处理，直到 ΔB 值达到适用范围且相对误差小于 2% 为止。

关于膜片老化处理一般采用下列方法：①加压至 300kPa，蜂鸣器尚未鸣响时需先检查电路；电路正常时，用 300kPa 气压循环老化数次；每次需从零开始，若 ΔB 达适用范围则停止老化，若用 300kPa 压力老化后 ΔB 仍很高，可将压力增至 350kPa 循环老化；倘仍无效，再加压力，每次升幅一般取 50kPa。②在空气中老化膜片，最大压力一般不超过 600kPa。

7.8.9 本条规定了扁铲侧胀试验的步骤。

2 贯入主机与反力装置的安装与定位，事先用水平尺校准基座基准面，当其为水平状态后方可贯入，以保证侧胀板头、探杆（钻杆）对水平面的垂直度。为防止探孔偏斜造成深度误差及测试误差，在贯入过程中需随时用水平尺检查基座是否水平。

7 试验完毕后对气电管路作如下检查：①检查管路两端接头的导通性、绝缘性是否良好；②将管路一端密封放入水中，另一端接入 4MPa 气压，检查管路有无泄漏；③检查管路有无堵塞；将一根长管路一端接入测控箱上，另一端空着，加压 4MPa，压力表指针一般不超过 800kPa，超过此值，视堵塞程度加以修换；④检查管路是否夹扁或破裂。

7.8.11 本条规定了扁铲侧胀试验资料整理与分析。

1 扁铲侧胀试验中测得的 A 压力是作用在膜片内部使膜片中心向周围土体水平推进 0.05mm 时所需的气压，为获得膜片在向土中膨胀之前作用在膜片上的接触力 p_0 （无膨胀时）需要修正 A 压力以考虑膜片刚度、 0.05mm 膨胀本身和排气后压力表零度偏差的影响。Marchetti 和 Crapps（1981 年）假设土—膜界面上的压力与膜片位移间的关系成线性，如图 7-3 所示，这样可得公式（7.8.11-1）。同样，试验中测得的 B 压力是作用在膜片内侧使膜片中心向周围土体推进 1.10mm 时所需要的气压，考虑到膜片刚度和排气后压力表零度偏差。故膜片膨胀 1.10mm 时的膨胀压力 p_1 可根据公式（7.8.11-2）得到。根据正常的压力膨胀程序获得常规的 A 和 B 压力，还可以读取 C 压力以获得在控制排气时膜片回到 0.05mm 膨胀时膜片的压力，该压力读数 C 由公式（7.8.11-3）修正为 p_2 。

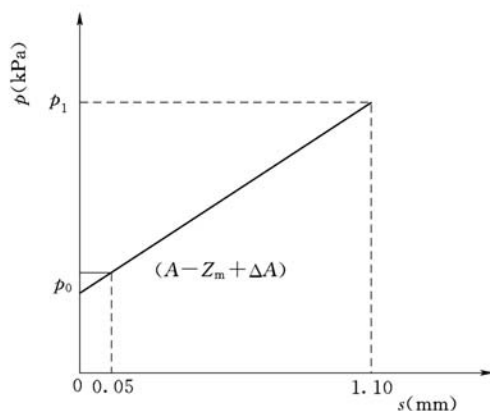


图 7-3 线性外推位移为零时的 p_0 值

2 扁铲侧胀试验时膜片向外扩张可视为在半无限弹性介质中对圆形面积施加一均匀荷载 Δp ，设弹性介质的弹性模量为 E 、泊松比为 μ 、膜片中心的位移量为 s ，则有：

$$s = \frac{4R \cdot \Delta p}{\pi} \cdot \frac{(1-\mu^2)}{E} \quad (7-8)$$

式中, R 为膜的半径, 即 30mm, 当试验中位移量 s 为 1.10mm 时, 且令 $E_D = E/(1-\mu^2)$ 则:

$$E_D = 34.7 \Delta p \quad (7-9)$$

式中, $\Delta p = p_1 - p_0$ 。

3 扁铲侧胀试验各曲线随深度变化反映了土层性质, 与静力触探曲线相比较有如下特征:

(1) 试验曲线连续, 具有类似静力触探曲线直观反映土性变化的特点;

(2) 黏性土的 I_D 值一般较小, U_D 值一般较大;

(3) 砂土的 I_D 值一般较大, U_D 值非常低, 接近 0;

(4) 在均质土中贯入, p_0 、 p_1 、 p_2 、 Δp 、 E_D 均随深度线性递增, I_D 、 U_D 保持稳定, K_D 则呈递减趋势;

(5) K_D 曲线很大程度上反映地区土层的应力历史, 超固结土 K_D 较大;

(6) 在非均质土中贯入, 各曲线起伏变化较大, 遇砂土变化加剧。

7.11 钻孔弹模试验

7.11.1 钻孔弹模试验主要试验方法包括钻孔膨胀计法、钻孔压力计法和钻孔千斤顶法。千斤顶法属刚性加压法, 设备简单, 便于操作, 测试速度较快捷, 适用于海上原位测试, 且适用地层范围广。本规程推荐采用钻孔千斤顶法, 编写参照了国际标准 BS EN ISO 22476-7: 2012 *Geotechnical investigation and testing—Field testing—Part 7: Borehole jack test* (岩土工程勘察与试验 原位测试第 7 部分: 钻孔弹模试验)。

土体是多孔介质, 具有压硬性, 其弹性模量随有效应力变

化, 钻孔弹模试验只测试其在原位有效应力下的弹性模量。

7.11.5 钻孔弹模试验加、卸载过程所记录和处理的数据, 需要以承压板位移 e 为横坐标, 以按式 (7.11.5-1) 计算得到的平均接触应力 p_c 为纵坐标, 绘制 p_c-e 关系曲线, 而弹性模量 E_B 应由 Δp_c 和 Δe 值来确定, 其中, 卸载过程宜取 70%~30% 段差值。图 7-4 及表 7-3 为某钻孔弹模试验的范例。

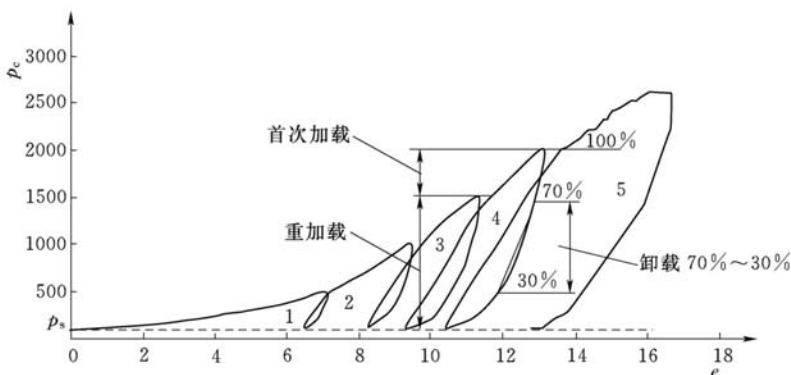


图 7-4 加/卸载循环中承压板平均接触应力与承压板位移的关系曲线

表 7-3 钻孔弹性模量计算表

加载循环序号	压力范围 (kPa)	钻孔弹性模量 E_B (MPa)		
		首次加载	重加载	卸载 70%~30%
1	100~500	2.24	—	—
	500~100	—	—	26.2
2	100~500	—	20.8	—
	500~1000	8.82	—	—
	1000~100	—	—	27.4
3	100~1000	—	22.4	—
	1000~1500	12.1	—	—
	1500~100	—	—	26.9

续表 7-3

加载循环序号	压力范围 (kPa)	钻孔弹性模量 E_B (MPa)		
		首次加载	重加载	卸载 70%~30%
4	100~1500	—	22.9	—
	1500~2000	13.2	—	—
	2000~100	—	—	26.2
5	100~2000	—	22.5	—
	2000~2600	7.80	—	—
	2600~100	—	—	24.8

7.12 波 速 测 试

7.12.1 波速值可以应用于：①推导岩土体在小应变 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 条件下的动力参数，如地基的动弹性模量、动剪切模量、动体积模量和动泊松比；②场地土的类型划分和场地土层的地震反应分析；③在地基勘察中，配合其他测试方法综合评价场地工程性质。

地基的小应变动剪切模量 G_d 和动弹性模量 E_d ，根据测试的 V_P 、 V_s 值由下列公式计算：

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (7-10)$$

$$E_d = 2(1 + \mu_d)\rho V_s^2 \quad (7-11)$$

$$\mu_d = \frac{V_P^2 - 2V_s^2}{2(V_P^2 - V_s^2)} \quad (7-12)$$

式中： V_s 、 V_P ——地基的剪切波波速和纵波波速 (m/s)；

G_d ——地基的动剪切模量 (kPa)；

E_d ——地基的动弹性模量 (kPa)；

ρ ——地基的密度 (kg/m^3)；

μ_d ——动泊松比。

7.12.2 单孔法多采用孔口激振，孔内接收的单孔检层法，也常采用孔内一发双收的单孔悬挂式法。跨孔法需采用多个试验孔进

行测试,操作较复杂,工作实施也较为困难,对较深地层的波速测试不适用,在近海和潮间带风电场有海水覆盖的场地中,测试难度也较大。岩体声波测试测位置可以选择在地表露头、钻孔中,适用于岩体波速测试。

斯通利波是在两种不同介质的半空间体的交界面上传播的波,它是一种波速与两个介质的性质有关的变态瑞利波。斯通利波的存在与介质的弹性拉梅常数和介质密度有关。单孔悬挂法波速测试采用电磁激震,接收的是斯通利波,而非真实剪切波。悬挂法波速测试所测得的波速大小与土层的纵波速度、剪切波速度及井液的纵波速度有关,在低速松软土层中该值接近并略小于剪切波速,验证后可以作为剪切波的替代速度使用;在基岩或坚硬土层中该值远小于土层的剪切波速度,不可以作为剪切波的替代速度使用,但其数值的变化趋势可以作为划分地层的参考依据。

近海及潮间带海上风电场工程进行钻孔剪切波速测试方法使用情况见表7-4。

表7-4 海上钻孔剪切波速测试方法对比情况表

测试方法	钻孔数量	激发接收方式	原理	测试内容	测试方法优缺点	费用	海上作业适用性
单孔悬挂法	1孔	单孔内激发和接收,裸孔,需要泥浆护壁	在两种不同软地层介质半空间体的交界面上传播的变态瑞利波,通过测试其在土层中传播时间和距离,换算出近似的剪切波速	剪切波或斯通利波	测试精度较高,操作方便,适合陆上和水上作业,有效测试深度较深	成本低	松软土层适合
单孔检层法	1孔	地面激发,单孔接收,可使用PVC套管护壁	由地面震源产生纵、横波,经过土层,由在孔中的三分量检波器接收,根据波传播的距离和走时计算出土层的波速	剪切波纵波	测试精度较低,陆上操作方便,海上操作困难;有效测试深度较浅,剪切波较难判断	成本较低	不甚适合

续表 7-4

测试方法	钻孔数量	激发接收方式	原理	测试内容	测试方法优缺点	费用	海上作业适用性
跨孔法	2孔或3孔	1孔激发, 1孔内双接收或1孔内激发, 2孔接收, 可套管护壁	在1孔内激发纵、横波, 经过土层, 由在其他孔中的三分量检波器接收, 根据波传播的距离和走时计算出土层的波速	剪切波纵波	测试精度较高, 海上实施难度大, 有效测试深度较深, 需要较多钻孔, 成本高, 对钻孔技术要求高	成本较高	不甚适合

7.12.3~7.12.5 震源激发设备也称作震源或激发换能器, 信号接收设备也称作检波器或接收换能器。常用换能器包括孔中接收、发射换能器, 一发双收或一发多收单孔测试换能器, 弯曲式接收换能器, 夹心式发射换能器。

单孔检层法和跨孔法是主要的场地地层的剪切波速度的常规测试方法, 要求震源能产生足够的剪切波能量, 抑制纵波能量, 需使震源产生的横波与纵波能量比尽可能提高, 故常采用能反复激振, 并能反向冲击的机械震源装置。机械震源装置目前主要有两大类型: ①一般通用的标准贯入试验装置, 特点是结构简单, 加工方便, 易于操作, 振动能量大, 传播距离远。几乎把所有的能量集中在竖直轴上, 能把大量能量转换成剪切能, 产生很大的剪切波能量, 这种震源装置主要用于土层中的跨孔波速试验; ②井下剪切锤, 主要由一个固定的圆筒体和一个活动质量块组成, 适用于各种地层中的钻孔波速试验。特别是在能在钻孔中的任一深度处通过液压装置将筒体与孔壁紧贴, 上下拉动和松开连接质量块的绳子, 使活动质量块上、下冲击固定的筒体, 使地层产生很大的剪切波能量, 并能重复激振, 双向冲击, 适用于测定较深地层中的动力参数。

单孔检层法和跨孔法均采用三分量检波器作为检测振动信号的接收装置, 它由三个检波器, 按相互正交的方向固定在一个圆

柱形的非磁性的塑料管或铝合金管内。国内三分量检波器的自振频率一般为 27Hz 和 8Hz，由机械震源装置激振所产生的剪切波序列的主要频率为 70Hz~130Hz，其自振频率为主要频率的 $1/4 \sim 1/3$ ；从国外引进的三分量检波器的自振频率一般为 8Hz。采用三分量检波器的目的主要用竖直检波器接收剪切波，用相对于震源径向排列的水平检波器接受纵波，同时可相互校验波到达的时间。

悬挂式波速测井仪主要采用悬挂式全密封（防水）电磁式激震源，一般供电电压直流 48V，电流 $\leq 6\text{A}$ 。该方法不需地面震源，为一发双收装置，震源和检波器同时置于井孔中，震源与检波器固定距离分别为 1m 和 2m。由于震源靠近接收检波器，信号较强，可有效地压制其他干扰波，受场地条件限制较小，适当加长采集电缆，基本不受钻孔深度影响。

7.12.7 当钻孔孔深大于 15m 时，如果钻孔发生倾斜，其孔深与竖直高度偏差较大，尤其在进行单孔检层法和跨孔法测试时，需要计算测点的相对空间位置，就需要通过测斜来了解钻孔的方向角及倾角，以计算不同孔深处的相对坐标。

7.12.8 单孔悬挂法和岩体声波测试只能在裸孔内进行，若有保护套管需要在测试前移除套管保护；单孔检层法和跨孔法测试时可以有保护套管护壁，要求套管内径与检波器或尺寸相匹配，孔壁与套管之间的间隙需灌浆或用砂充填，以保证波的传播。测试孔内的套管尽量选用硬塑料套管，因波在钢管的传播速度大（约 5000m/s），容易传播钢管本身的剪切振动，会沿钢管长度方向产生机械波，导致波的传播和接收的复杂化。由于硬塑料套管不能抵抗浪、涌的冲击和振荡，所以目前海上钻孔的保护套管一般选用钢质套管。不同的套管材料，充填材料，填料的密实度，以及采用套管与否等对所测定的波速值的影响程度，尚需进一步积累资料，以便提出更合理的要求。

7.12.10 测试前一般需要对钻孔进行简单处理，清理钻孔周边的松散体，确保测试过程中无杂物落入孔内，为防止测试电缆、

震源激发设备、信号接收设备和其他孔内设备等被孔口刮破，钻孔孔口需使用胶布、布条等软物进行包扎；用合适尺寸的通孔器进行多次通孔，检查钻孔内有无缩径、倾斜或异物堵塞等情况，确认孔内水位及孔深，确保测试工作能正常进行，保证测试设备的安全。

7.12.11 根据操作难易程度和测试设备特点，测点间距不能太密，一般为 0.5m~1m。在进行现场测试时可以根据数据变化情况适时加密，尽量保证所测数据能反映地层变化情况。由于近海浅地层多为泥质或砂土质，钻具提出后易发生孔径变化或塌孔情况，为保证测试工作正常进行，大多海上风电场工程剪切波测试需要在钻孔终孔后或钻具提出后马上实施，要求尽量选用快捷便利的测试方法。

单孔检层法主要测试水平方向上的剪切波速，即要保证剪切波能量衰减不能太快，还要保证能够正确识别第一个剪切波的初至。需要对剪切波震源和激震方法进行严格要求，板上所压重物一般大于 400kg；采用从两个相反方向激振，纵波的初至极性不发生变化，而第一个剪切波到达点的极性产生 180° 改变，极性波的交点即为第一个剪切波的到达点。

7.12.12 单孔法资料整理过程中，如果靠近地表的地层为低速层，下有高速层可能会产生折射波，因此，除在本规程中规定的震源离孔的距离外，在资料整理中也需考虑这一问题。

另外，在计算波速时，要求作斜距校正，本条是将震源理想化为点，以此进行斜距校正，当测试深度超过 15m 时，可以不再作斜距校正。

7.12.13 跨孔波速试验采用 2 个钻孔，可能引起震源触发器开关的延迟，波的传播路径改变等因素所产生的计时误差可能影响波速值的准确度，因而每组跨孔波速试验推荐采用 3 个钻孔，取间隔速度值，排除了震源装置一系列因素的影响，这种间隔速度值的准确度完全满足工程的要求。

钻孔的孔距很重要，因为该方法的基础是接收直达的纵波初至和第一个直达剪切波的到达时间。根据折射波的形成传播特点，最佳孔距的确定，既要防止接收到折射波，又要考虑到仪器的计时准确度，同时还要考虑震源能量所传播到的距离。理论分析表明：测试结果误差随孔距的增大而增加。

7.12.14 激振能量除一部分直达检波器外，同时还向各个方向散射，其中部分散射到地面。而地表面是一个良阻波面，又将部分能量反射入地层，其中部分到达检波器，这就干扰了直达波的接收；接收点距地面越近，干扰越严重。所以，本条规定第一个测点深度应设在孔口以下 0.4 倍孔距处。

7.13 电阻率测试

7.13.1 电阻率测试利用探测对象与相邻介质之间的电阻率或电学特性差异，观测研究与探测对象有关的直流电场的分布特点和规律。目前海上电阻率测试常采用电阻率测井法或电测深法测试，主要用于测定地层、井液和地下水的电性参数及测量风电场区各地层的视电阻率。本规程中，电阻率测试的主要目的是提供场区相关地层及水的电阻率值。常见岩土介质及水的电阻率见表 7-5。

表 7-5 常见岩土介质及水的电阻率

类别	名 称	电阻率 ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)
土体	黏土	$1 \sim 2 \times 10^2$
	含水黏土	$0.2 \sim 10$
	亚黏土	$10 \sim 10^2$
	砾石加黏土	$2.2 \times 10^2 \sim 7 \times 10^3$
	亚黏土含砾石	$80 \sim 240$
	卵石	$3 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$
	含水卵石	$10^2 \sim 8 \times 10^2$

续表 7-5

类别	名 称	电阻率 ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)
沉积岩	泥质页岩	$60 \sim 10^3$
	砂岩	$10 \sim 10^3$
	泥岩	$10 \sim 10^2$
	砾岩	$10 \sim 10^4$
	石灰岩	$6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^3$
	泥灰岩	$1 \sim 10^2$
	白云岩	$50 \sim 6 \times 10^3$
	破碎含水白云岩	$170 \sim 600$
	硬石膏	$10^4 \sim 10^6$
	岩盐	$10^4 \sim 10^6$
变质岩	片麻岩	$6 \times 10^2 \sim 10^4$
	大理岩	$10^2 \sim 10^5$
	石英岩	$2 \times 10^2 \sim 10^5$
	片岩	$2 \times 10^2 \sim 5 \times 10^4$
	板岩	$10 \sim 10^2$
岩浆岩	花岗岩	$6 \times 10^2 \sim 10^5$
	正长岩	$10^2 \sim 10^5$
	闪长岩	$10^2 \sim 10^5$
	辉绿岩	$10^2 \sim 10^5$
	辉长岩	$10^2 \sim 10^5$
	玄武岩	$10^2 \sim 10^5$
其他	地下水	$< 10^2$
	河水	$10^{-1} \sim 10^2$
	冰	$10^4 \sim 10^8$
	岩溶水	$15 \sim 30$
	海水	$10^{-1} \sim 10$

7.13.3 电阻率测试设备应当具备测量范围大，精度高，重复性好，输入阻抗高，抗干扰能力强，温度、湿度特性好，可以在恶劣的现场条件下工作的性能，且操作简单、方便。测量时需要检查极距、漏电、接地、仪器及接线情况，查询接地位置及附件情况。两台或两台以上的仪器在同一工点工作时，需要进行一致性测定，允许差值为 $\pm 2\%$ 。仪器设备及其附加设备需要满足性能稳定、结构合理、构件牢固可靠、防潮、抗震和绝缘性良好等要求，仪器应当定期检查、标定和保养。

当出现负电阻率时，需要改变参数或观测装置后再进行测量，若负电阻率现象仍不能消除，说明该地段不适宜直流电法进行勘探，应当采用其他合适方法。钢套管的电阻率接近于零，地层的电阻率大于零，如果在测井过程中出现负值和套管中出现不归零的现象，说明观测回路中出现了故障，是一个错误的观测结果，需查明原因消除故障后才能继续测试。

7.13.4 在进行电阻率法的资料整理与解释应当明确视电阻率和真实电阻率关系，视电阻率用来反映岩石和矿石导电性变化的参数，用符号 ρ_s 表示。决定视电阻率大小的因素有：①各岩层地质体的真电阻率；②地下不同电性体实际分布状况（各电性体的厚度、大小和形状、埋藏的深浅）；③供电电极和测量电极的相互位置以及与非均匀电性层的相对位置。当所有的测量条件都达到理想的要求或只有在均匀无限介质中，测量出来的视电阻率就等于或接近真实电阻率。一般情况，工程中把视电阻率视作介质在特定条件下的地层或水体的电阻率值。

7.13.5 电阻率测井是把普通的电极系（由三极、对称四极或微电极系装置等组成）放入钻孔内，测量钻孔岩土电阻率变化的曲线。在测量地层电阻率时，除受各种岩土电阻率的综合影响外，还要受井径、泥浆电阻率、上下岩土层及电极排列等因素的影响，测得的参数不完全等同于地层的真实电阻率，而是被称为地层的视电阻率，因此又称为视电阻率测井。

7.13.6 在均匀无限介质中，任意一点的电位 V 与介质的电阻率 R 及供电电流 I 成正比，与该点至电源点之间的距离 r 成反比。要测量均匀无限介质的电阻率，只需在介质中放入点电源，测出场中一点的电位 V ，在已知供电电流 I 和测点与电源点的距离 r 的情况下，就可以计算出介质的电阻率 R 。假定被测定的地层很厚，没有泥浆侵入，井筒中的井液电阻率等于地层的电阻率，则井下介质就其导电性，可视为无限均匀介质。因此当钻孔内部与外界地层为绝缘状态、良导体状态或在电磁环境下均不能进行电阻率测井。

7.13.7 电阻率测井多采用三极装置或对称四极装置。三极装置 AB 极位于无穷远处，接地电阻相对较大，受井液和与孔壁的距离影响较小，所测得的电阻率相对较准确，装置回路电流较稳定，但易受周边环境的影响；对称四极装置 AB、MN 极均位于钻孔内，要降低井液的影响，就要使测井装置尽量靠近孔壁。

7.13.9 理论上海水的导电性比较好，易于获得较大的供电电流（大到数百安培）；测量电极接地电阻小均匀而稳定，可提高测量精度，通过电测深等电阻率测量装置加以改进，也可以获得地层电阻率，但由于海上实施电测深法比较困难，通过海上电测深获得较准确地层电阻率的方法还不成熟，也没有相关文献。所以海上地层电阻率主要是通过电阻率测井获得，但对陆上升压站、潮间带等可以露滩的位置仍然可以采用电测深的方法获取地层电阻率。

测量电极一般选用铜质电极，供电电极一般选用铜、钢或铁质电极，水上或冰上使用铅电极。电极直径不小于 12mm；电极在使用前需除锈、除氧化层。测试前需检查确认电极和电缆接线正确、接地良好。

7.13.11 在正常测试中遇到如下情况，需要进行重复观测：

- ①外部干扰较大，读数困难或过小，单次观测难以保证精度的极距或测段；
- ②供电电极距大于 500m 的大极距测段；
- ③电测深曲

线畸变点或无规律的极距；④目标异常段的特征不明显的极距；⑤数字仪器显示错误指示或数字尾数跳跃较大的极距。

对电测深曲线上的畸变点、畸变线段以及基本观测质量有疑义测段，需要进行检查观测。检查观测需将测量电极重新布设或改变供电电极的接地状况，且供电电流的改变量应大于 25%。检查结果证明原始观测确实有误时，可以用检查观测数据代替原观测数据。

7.13.12 供电电极 AB 多采用六阶极距，AB/2 通常为 1.5m、2.15m、3.16m、4.64m、6.81m、10.0m、14.7m、21.5m、31.6m、46.4m、68.1m、100m 和 147m，以此类推。测量电极 MN 极距多采用为 1.0m 和 10.0m。

7.13.13 根据各极距测得的视电阻率值，采用双对数坐标纸绘制电测深曲线，其横坐标为 AB/2，纵坐标为视电阻率 ρ_s 。电测深曲线解释一般分定性解释和定量解释，定性解释是根据视电阻率曲线形状，判定地电层数及曲线类型；电测深曲线的定量解释一般采用“量板法”或拟合法，通过理论计算电测深曲线和实测电测深曲线进行对比，求解各电性层的电阻率和厚度。

根据电测深曲线形态，一层、二层、三层地电断面视电阻率曲线类型划分如下：

(1) 一层结构地电断面，电测深曲线为一条 $\rho_s = \rho_1$ 的平行于横轴的直线。

(2) 二层结构地电断面，当 $\rho_1 > \rho_2$ 时，为 D 型曲线；当 $\rho_1 < \rho_2$ 时，为 G 型曲线。

(3) 三层结构地电断面，分为四种类型：①当 $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ 时，为 H 型曲线；②当 $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ 时，为 K 型曲线；③当 $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ 时，为 A 型曲线；④当 $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ 时，为 Q 型曲线。

(4) 四层电测深曲线类型按曲线形态以三层分段顺序命名。

8 水质分析

8.1 pH 值测定

8.1.1 pH 值的测定有试纸法、比色法和玻璃电极法，以玻璃电极法的准确度和精度最佳。目前商品酸度计型号较多，携带式酸度计的精度可达到 0.1 以上，笔式 pH 计的准确度和 pH 试纸高。

8.1.3 pH 标准缓冲溶液每次使用后需密封放置阴凉处保存，过期需及时更换。配制的十水四硼酸钠标准缓冲溶液一般可以稳定三个月。

pH 标准缓冲溶液如在冰箱中贮放，在测定前需先在室温中放置一些时间。待与试样温度相差小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 时，再进行校准和测定。配制饱和氯化钾溶液时，溶液与未溶解的固体氯化钾共存。

8.1.5 室内测定时的温度低于现场温度时，按表 8.1.5-1 查得 pH 温度校正值为负数。

8.2 钙、镁离子测定

8.2.1 EDTA 滴定法用于海水测定时，一般将海水稀释 100 倍左右。

8.3 氯离子测定

8.3.1 硝酸银滴定法和硝酸汞滴定法都属老方法，由于准确度和精确度均较好，目前仍广泛使用。高于测定范围浓度的样品，经稀释后可扩大其适用范围。测量的准确度可用相对误差来表示，精确度可用相对偏差表示。相对误差为测量值与真值之差的

绝对值再除以真值，再乘以 100%。相对标准偏差为标准偏差与计算结果算数平均值的比值。

当采用电位法时，电位滴定法的准确度和精确度较高，一般测定时可用直接电位法或标准加入稀释法。离子选择电极流动注射法较多用于浑浊、具色及高浓度氯离子含量的测定。

8.3.3 配制的荧光黄钠盐指示剂溶液可以稳定一个月，如有絮状物析出需重配。

8.4 硫酸根离子测定

8.4.1 硫酸根离子的测定方法较多，但快速、简便、准确度均好的方法少。规程中六种测定方法适用于不同含量的硫酸根离子的测定。EDTA 滴定法适用于一般的海水样。

8.5 游离二氧化碳测定

8.5.1 游离二氧化碳在水中极不稳定，在采样后需要及时进行分析，并需要在密封条件下保存和试验。

8.7 铵离子测定

8.7.1 蒸馏滴定法测定的铵离子含量最低检出限为 0.2mg/L，一般情况下铵离子含量大于 2mg/L 时测试结果较为准确。水样如含挥发性胺类，测定结果会偏高。

水杨酸-次氯酸钠盐分光光度法适用于地表水、地下水、海水及含胍处理水。

离子选择电极法测定水样时，水样具色、浑浊对测定无影响，温度及溶解离子总浓度影响测定结果。

8.8 碱度测定

8.8.1 地表水和地下水的碱度主要由重碳酸盐、碳酸盐及氢氧化物形成。水中含有磷酸盐、硅酸盐、氨基化合物及有机碱等，

也会产生碱度。最常见的是重碳酸盐和碳酸盐。碱度以酸消耗量表示，单位为滴定酸的毫摩尔浓度（mmol/L）或换算成 1mol/L CaCO_3 表示。

8.9 钾、钠离子测定

8.9.1 火焰光度法是测定钠、钾含量最方便、最有效的方法。国产火焰光度计绝大部分专用于钾、钠离子的测定。原子吸收光度法的灵敏度与火焰光度法相近。测定钠、钾还有重量法和离子选择电极法。重量法虽有一定准确度，但操作麻烦，已较少采用。离子选择电极法精确度差，干扰大，适用于清洁的低矿化水中微量钠、钾的测定。

8.10 总矿化度测定

8.10.1 水样在规定条件下，透过滤器的溶解性物质，经过蒸干并于 105℃~110℃或 180℃烘干后的质量称为溶解性固体。它与过滤器的孔隙大小、蒸发温度、烘干时间有密切关系，需要严格按照规程执行。水样中含有大量钙、镁的硫酸盐、氧化物所形成的结晶水化物，在 105℃~110℃烘干不易除去结晶水，可能使测定结果偏高。为减少误差，要求在水样中加入适量碳酸钠，使钙、镁的非碳酸盐转变为碳酸盐，在 180℃温度下干燥至恒量，而加入碳酸钠的量需从测定结果中减去。

8.11 硫酸盐还原菌测定

8.11.1 硫酸盐还原菌是指在一定条件下能够将硫酸根离子还原成二价硫离子，进而形成副产物硫化氢，对金属有很大腐蚀作用的一类细菌，腐蚀反应中产生硫化铁沉淀可造成堵塞。本规程采用绝迹稀释法，即将欲测定的水样用无菌注射器逐级注入到测试瓶中进行接种稀释，送试验室培养，再根据细菌瓶阳性反应和稀释的倍数，计算出水样中细菌的数目。绝迹稀释法参考了国家现

行行业标准《碎屑岩油藏注水水质指标及分析方法》SY/T 5329—2012 的有关规定。

8.11.5 为了较为准确的测出细菌数，硫酸盐还原菌的测定采用了三次重复法或二次重复法。下面以三次重复法为例，分析某水样的硫酸盐还原菌含量，见表 8-1。

表 8-1 三次重复法计数表

稀释倍数	10^1	10^2	10^3	10^4
有菌生长测试瓶数	3	3	2	0
生长指标	332			

表中有菌生长测试瓶数表示，每个稀释倍数下，三组平行试验中共有多少个测试瓶中出现还原菌生长。确定有菌生长的测试瓶数后，选取最末相邻三个有还原菌生长的测试管数作为生长指标，本例中为“332”，查本规程中表 8.11.5-1 得该生长指标对应的细菌数为 110.0 个/mL。然后将所得细菌数，乘以生长指标中首位数字“3”对应的稀释倍数 10^1 ，即水样中硫酸盐还原菌含量为 110.0×10^1 个/mL。

9 土质分析

9.1 pH 值测定

9.1.1 pH 值的测定一般有比色法和玻璃电极法两种，考虑到玻璃电极法较比色法方便、准确，因此本规程采用玻璃电极法。

9.1.2 pH 计由选择性玻璃电极、甘汞参比电极和二次仪表电位计组成。玻璃电极和甘汞电极一般是分开的，也有复合电极将这两种电极合并为一支电极，其测定原理是一样的。

pH 计要求的是精度，则为读数到小数点后两位。现行国家标准《海洋调查规范 第8部分：海洋地质地球物理调查》GB/T 12763.8 中规定土质 pH 计准确度为 0.01，水质准确度为 ± 0.02 ，精确度为 ± 0.01 。

9.2 易溶盐化学成分分析

9.2.2 用水浸提易溶盐时，土水比例和浸提时间的选择，是力求将易溶盐从土中完全溶解出来，而又能尽量减少中、难溶盐的溶解。关于土水比例，根据各种盐类在水中溶解度不同，合理地控制土水比就有可能将易溶盐与中、难溶盐分开，即土水比例愈小，中、难溶盐被浸出的可能性愈小。如有采用 1:2.5、1:1 等土水比例的，但土水比愈小，会给操作带来困难愈大。因此，国内普遍选用 1:5 的土水比例。关于浸泡提取时间，在同一土水比例下，浸提时间不同，试验结果亦有差异。浸提时间愈长，中、难溶盐被溶解的可能性愈大，土粒和水溶液间离子交换反应亦显著。所以浸提时间宜短不宜长。研究表明，浸提时间在 2min~3min 即可。为了统一试验条件，本条采用 1:5 的土水比例，浸提时间为 3min。

浸出液过滤，在试验中经常遇到过滤困难，特别是黏土，需要很长时间才能获得需要的滤液数量，而且不易得到清澈的滤液。因此，一般采用抽气过滤方法效果较好，操作也简便，过滤速度快。如果滤液混浊，则需要改用离心或超级滤芯过滤。

9.3 土质全量化学成分分析

9.3.4 根据试验要求按浓度从低到高配制 STD1、STD2、STD3 和 STD4 四种混合标准溶液。体积分数指浓硝酸或者浓盐酸等试剂从原始浓度按照酸水不同体积比进行稀释得到的试剂浓度来表示单位，以量取的试剂体积分数表示，与摩尔浓度进行区分。

9.3.5 重复性是指用相同的方法，同一试验材料，在相同的条件下获得的一系列结果之间的一致程度。相同的条件是指同一操作者，同一设备，同一实验室和短暂的时间间隔。再现性是指用相同的方法，同一试验材料，在不同的条件下获得的单个结果之间的一致程度。不同的条件指不同操作者、不同实验室、不同或相同的时间。

9.3.9 本条第 7 款中采用体积分数为 2% 硝酸介质，对大多数元素的等离子质谱测定是合适的。但海底沉积物中 Mn、Ti、Ba、La、Ce、Nd 的含量较高，容易形成 ArO、MN、MO、MAr、MH、 M^{++} 等干扰物，干扰 Ga、Eu、Lu、Y、Hf、W 等元素的测定。本规程采取干扰系数法校正上述六种元素对其他元素可能产生的干扰。

本条第 11 款中干扰元素（Ba、Mn、Ti、La、Ce、Nd）对被测各元素的干扰系数为各元素浓度与干扰校正用单元素标准溶液浓度之比。采用高分辨率 ICP-MS 仪器或化学分离测定稀土元素，可以不校正 Ba 对重稀土元素的干扰。

9.4 氧化还原电位测定

9.4.1 氧化还原电位法主要参考现行国家标准《海洋监测规范

第5部分：沉积物分析》GB/T 17378.5的有关规定。

9.4.3 配制的缓冲溶液在25℃时的pH值为4.01。

9.4.5 温度每增加10℃， E_a 约降低6mV~7mV，由于 E 的最小读数误差为5mV，故若温度变化不显著时，可以不作校正。

9.5 腐蚀电流密度测定

9.5.1 腐蚀电流密度是通过极化曲线测定，读取规定电压相对应的电流密度数值作为测定值。一般在现场测定，也有在室内测定的。土壤可能因电阻率较高产生IR降误差，另外测定结果是瞬时值，在确定腐蚀性等级时，需加以考虑。

9.5.4 调节便携式土壤腐蚀测量仪的平衡电阻可以按照便携式土壤腐蚀测量仪使用说明书操作。

9.6 有机质试验

9.6.1 烧失量是全量分析的一个组成部分。它不包括吸湿水，仅包括有机质和结合水，石灰性土中还包括二氧化碳（由碳酸盐所产生）。因此，需要用烘干土做烧失量测定。

9.6.3 关于烧失量的灼烧温度，有文献采用550℃或700℃，本规程统一采用550℃。

坩埚放入干燥器中的平衡时间，要尽量一致，称量越快越好，以免样品吸湿。称量时切不可用手直接拿取坩埚，可以戴上干净的汗布手套拿取，也可以用坩埚夹取。

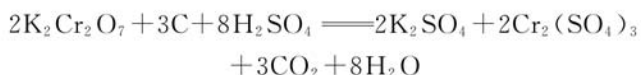
若遇到有机质含量高的样品时，可以预先放在四孔小电炉上碳化后，再放入高温炉中灼烧。

9.6.5 表9.6.5中，绝对偏差表示各个测试值与所有测试值的算术平均值之差；相对偏差表示绝对偏差占算术平均值的百分比。

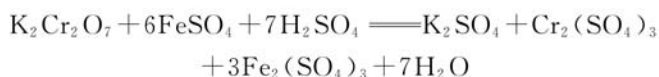
9.6.7 由于重铬酸钾氧化能力有限，故不适用于有机质含量高于150g/kg（15%）的土样。

9.6.8 重铬酸钾容量法是测定土中有机质比较通用的方法。它是通过强氧化剂重铬酸钾加热来氧化有机质，以氧化剂的消耗量求出有机质的量。用过量的重铬酸钾、硫酸溶液，在加热条件下氧化土中有机质，剩余的重铬酸钾则用硫酸亚铁或硫酸亚铁铵的标准溶液滴定，从而得到氧化有机质的重铬酸钾的消耗量，根据重铬酸钾的消耗量乘上换算系数，便可以计算出土中有机质的含量。其反应式如下：

重铬酸钾-硫酸溶液与有机质作用：



硫酸亚铁滴定剩余重铬酸钾的反应：



9.6.10 为避免加入浓硫酸后急剧升温，每加约 100mL 浓硫酸后可以稍停片刻，并把大烧杯放在盛有冷水的大塑料盆内冷却，当溶液的温度降到不烫手时再加另一份浓硫酸，直到全部加完为止。实际操作时可以根据使用情况酌情增减试剂配制体积，但需保证浓度为 0.4mol/L。

硫酸亚铁标准溶液易被空气氧化而致浓度下降，每次使用时需标定其准确度。

9.6.11 若滴定所用硫酸亚铁溶液的毫升数不到空白试验所耗硫酸亚铁溶液毫升数的三分之一，则需减少土样量重测。

10 黏土矿物分析

10.1 X射线衍射分析

10.1.1 沉积物中除了无机矿物成分外还含有有机组分和无定形物质，X射线衍射法只能检测有晶体结构的矿物类型，定量结果代表的仅是待测组分在有晶体结构的矿物中的相对含量。

10.2 差热分析

10.2.1 差热分析测试原理为利用矿物在升温过程中所出现的脱水、分解、氧化、同质多相转变所产生的热效应来鉴定黏土矿物的种类。

10.2.4 部分差热分析仪直接使用氧化铝坩埚进行分析，无需额外用氧化铝作为参比物，操作步骤类似。

10.2.5 差热曲线以温度为横坐标，吸热与放热为纵坐标（图10-1）。

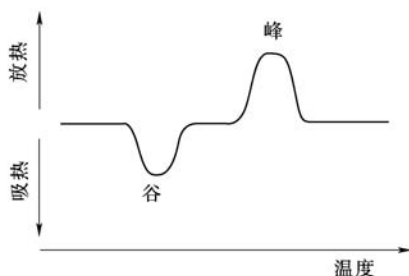


图 10-1 差热曲线示意图

伊利石和蒙脱石的差热曲线特征比较相似，仅仅在第二个吸热谷的位置和形状有微小差异。当第二个吸热谷分辨不明显时还

需要其他辅助手段对比。

10.3 扫描电镜分析

10.3.4 不同厂家不同型号设备的最佳测量参数均有差异，因此在仪器分析条件方面可根据实际情况进行调整。

10.3.5 扫描电镜分析主要参考现行国家标准《微束分析 沉积岩中自生粘土矿物鉴定扫描电子显微镜及能谱仪方法》GB/T 17361—2013，主量元素含量以氧化物形式给出。分析时应选择相应标准物质进行比对和校正，常见的沉积岩黏土矿物进行能谱分析时的标样有以下种类：

(1) 国家标准物质可参见表 10-1。

表 10-1 国家标准物质

名 称	化学式	标准代号
石英	SiO_2	GSB A70086—92
刚玉	Al_2O_3	GSB A70013—86
方镁石	MgO	GSB A70077—93
钛氧磷酸钾单晶	KTiOPO_4	GSB A70030—88
方钠石	$\text{Na}_2(\text{AlSiO}_4)(\text{Cl})_2$	GSB A70023—87
方锰矿	MnO_2	GSB A70040—89
硅灰石	CaSiO_3	GSB A70015—86
氧化铬	Cr_2O_3	GSB A70041

(2) 在国家标准物质名录中没有的物质，可参照表 10-2 所示种类。

表 10-2 其他标准物质

名 称	化 学 式
赤铁矿	Fe_2O_3
金红石	TiO_2

续表 10-2

名 称	化 学 式
重晶石	BaSO_4
天青石	SrSO_4
硬石膏	CaSO_4

采用第 5 款鉴定黏土矿物成分时，首先根据黏土矿物形态特征以确定其类型，而对形态特征相似难以区分的黏土矿物，可以利用能谱仪的成分分析结果作为辅助鉴定指标。

11 海底浅层气及含气土试验

11.1 海底浅层气测试

11.1.1~11.1.4 海底原位测量及取样装置可以用于获取海底沉积物孔隙水压及气体的饱和度，也可以配合采样容器对孔隙流体及浅层气取样，不同探头顶端的尺寸和形状具有不同规格，实地操作时每个顶端均要着重描述其过滤直径和长度。离岸操作时，海底浅层气取样与钻孔同时进行。

11.1.6 本条对气相色谱法测定气体组分的仪器设备进行了规定。气相色谱法分析主要参考国家现行标准《天然气的组成分析 气相色谱法》GB/T 13610—2014 的相关规定。

1 气相色谱仪的检测器一般选用热导检测器，或在灵敏度和稳定性方面与之相当的检测器，检测器温度需大于或等于最高柱温并保持恒定，其变化需在 0.3°C 以内。

3 柱内填充物对被检测组分的分离需达到规定的要求，常用填料包括分子筛、氧化铝和多孔性聚合物微球。

11.1.7 在宽浓度范围内，色谱检测器并非真正的线性，需在与被测样品浓度接近的范围内建立线性。

11.1.9 本条对试验步骤进行了规定。

2 进样系统配备带定量管的进样阀，定量管体积一般为 $0.25\text{mL}\sim 2\text{mL}$ ，内径 2mm 。

3 塑料或铜制品常对气样组分具有吸附性，或与之反应，故一般不选用。

4 反吹重组分在进行色谱分析时通过切换阀完成的操作，目标组分进入分析柱，非目标组分（一般主要为重组分）经过放空口放空，防止其进入其他色谱柱并缩短分析时间。水平范围是

指待测样品每个元素含量的分布范围。

11.1.10 浅层气样品和已知组成的标准气，在相同的操作条件下，用气相色谱法进行分离。已知标准气的组成值，通过对比峰高、峰面积或两者，可以计算浅层气的样品组成。不同型号气相色谱仪的最佳工作条件不同，样品进样量及反吹时间等按照仪器使用说明书进行操作。

11.2 海底含气土力学性质试验

11.2.1 浅层气在海底土体中主要以溶解、吸附、游离和水合物形式赋存。但水合物多在特定的温度和压力环境下（低温环境、水深一般大于 300m）生成，往往赋存于深海区域，一般不会对海洋近岸工程造成影响，因此本节试验不适用于水合物土体的测试。由于气体易于逸散，海底含气土原状样的获取十分困难，且费用高昂；即使获取原状样品，在试验室条件下仍存在难以对样品进行二次加工的问题。因此，原位测试是获取海底含浅层气区域含气土体相关力学指标的最有效手段。但若因条件所限，可以采取室内人工制备重塑含气土样品的方法，开展三轴试验获取相关力学指标。因此，本规程只对室内人工制备重塑含气土的三轴试验做出规定。

国内外现有的研究表明：赋存于海床浅部的含气沉积物一般初始饱和度较高（ $S_0 \geq 80\%$ ），初始状态处于水相连同而气相封闭状态，属于高饱和度的非饱和土。砂质沉积物往往是海底游离态浅层气的良好储集体，而细颗粒土中赋存的气体量较少，多以吸附和溶解态存在。迄今，砂质含气土的重塑制样方法相对成熟，而对于细颗粒的粉土或黏性土中，气体常以游离大气泡态（气泡尺寸大于土颗粒粒径）或微裂隙气形式赋存，且气泡或裂隙大小不均一，土体渗透性较差，其相应的室内重塑土制样方法尚不完善。因此，本节试验方法仅适用于含气砂土。

目前应力路径三轴仪普遍采用直径 50mm、高度 100mm 的

三轴试样，根据土样最大允许粒径为试样直径的 $1/10$ 的要求，本条规定试验适用于粒径不大于 5mm 的含气砂土。

11.2.2 由于制备与现场相符的不同含气量和干密度含气土样，其制备过程较复杂，需借助具有高级加载系统的三轴设备，直接在三轴压力室内完成三轴样品的制备。考虑目前国内许多单位均已配备具备高级应力路径加载的三轴设备，因此，试验所需设备为高级应力路径三轴仪（图 11-1）。三轴仪的体变量测内压力室（图 11-2）和溶气仪（图 11-3）是含气土样制备的必用设备，其构造简单、原理明确。其中，体变量测内压力室一般为三轴仪的配套定型产品，而溶气仪尚未有市场化的定型产品，给出其原理图供参考，可以根据具体情况加工制作。

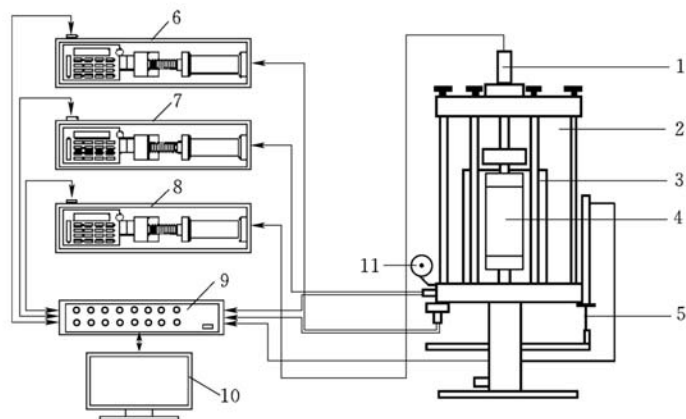


图 11-1 高级应力路径三轴仪示意图

- 1—轴力传感器；2—外压力室；3—体变量测内压力室；4—三轴试样；
5—轴向位移传感器；6—反压控制系统；7—围压控制系统；8—轴力
（轴向位移）控制系统；9—数据控制/采集系统；
10—计算机控制系统；11—差压传感器

11.2.3 含气土的三轴试验操作相对复杂，技术要求高，如操作不当，易得到不正确的试验成果，其复杂性主要集中于含气土样

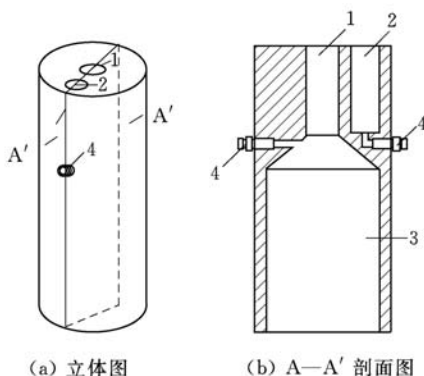


图 11-2 三轴仪的体变量测内压力室示意图

1—轴压杆穿入孔；2—体变参照管；3—压力室内腔；4—接头（连接差压传感器）

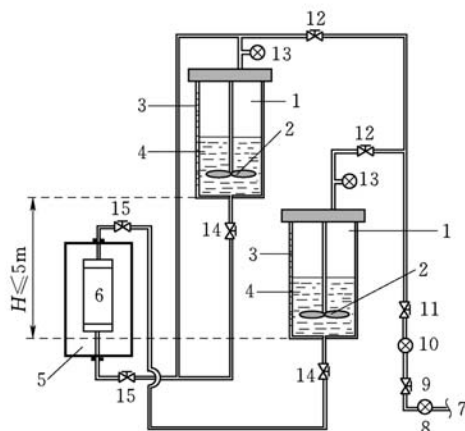


图 11-3 溶气仪工作原理图

1—溶气反应釜；2—磁搅拌装置；3—侧壁观察窗；4—水溶液；5—三轴外压力室；6—试样；7—气源；8—气源压力表一；9—减压阀；
10—气源压力表二；11—一级截止阀；12—二级截止阀；
13—气压表；14—三级截止阀；15—接头控制阀

的制备过程。以重塑方法制备含气三轴样品前,需依据现场含气区域气压、水深、海底埋深、水温、沉积物密度和饱和度等资料,进行室内制备方案设计。尤其要根据现场海床含气层的埋藏水深,确定室内三轴试验所需模拟的反压水平。

海洋环境中的浅层气多数组分以甲烷型生物气为主(CH_4 含量大于90%),但因甲烷为易燃易爆气体,试验室条件下受限,本规程中采用二氧化碳气体代替甲烷气体。已有的国内外注入不同气体的含气土试验(氮气、氢气、甲烷、乙烯、二氧化碳等)对比表明,二氧化碳气体稳定,试验室内安全且市场中易获取,虽然相同温度和压力下在水中的溶解量比甲烷大,但这对工程而言是偏安全的。

为了在试验室内人工以可控的方式模拟制备出不同初始含气量和不同气压状态的含气土体,采取在室内恒温条件下,将饱和试样中的溶气水,通过逐步卸压使所溶气体脱溶的方式来制备。以干密度为制样依据,按照饱和砂土试验方法,首先制备出饱和砂土样品,加压至相应的应力条件(有效应力保持与现场条件一致,所加反压依据现场土体饱和度并借助 Boyle 定律和 Henry 定律换算得出),然后在该条件下固结稳定;利用溶气仪中饱和二氧化碳的溶气水驱替饱和试样中的无气水,通过同步降低围压和反压的方式,使孔隙水中的溶解气体脱溶,直至稳定后的孔隙水压力与现场条件一致;脱溶气体量通过试样的体变量换算得出,并依据公式(11.2.3-1)、公式(11.2.3-2)反算出试样制备完成后的饱和度和孔隙比。

11.2.4~11.2.6 饱和砂土中有气体产生后,会随气体含量的增加引起其透水性降低,同时海底含气土初始饱和度较高,处于水相连续、气相封闭的非饱和态,目前尚无可靠的方法可以直接测定土样中封闭气泡内的压力,Freidlund(1993)研究建议:此类土体可以假定其孔隙气压力与其孔隙水压力相等,对工程不会造成过大的误差。室内三轴试验中,考虑排水会导致土样内部的

气体流失，因此试验只用于获取不同干密度和初始含气量的含气土的不排水参数指标。

含气土三轴试验的复杂性主要集中于含气土样的制备过程。样品制备完成后，其后续试验过程可参照相关的饱和土在不排水条件下的三轴试验的操作步骤。

12 岩石物理力学性质试验

12.6 单轴抗压强度试验

12.6.3 试验的含水状态，可以根据需要选择天然含水状态、烘干状态、饱和状态或其他含水状态。

12.6.4 加载速度对岩石抗压强度测试结果有一定影响。本条规定的每秒 0.5MPa~1.0MPa 的加载速度，与当前国内外习惯使用的加载速度一致。在试验中，可以根据岩石强度的高低选用上限或下限。

12.6.5 当试件无法制成本规程第 4.2.13 条要求的高径比时，一般按下列公式对其抗压强度进行换算：

$$R = \frac{8R'}{7 + \frac{2D}{H}} \quad (12-1)$$

式中：R——标准高径比试件的抗压强度（MPa）；

R'——任意高径比试件的抗压强度（MPa）；

D——试件直径（cm）；

H——试件高度（cm）。

12.7 单轴压缩变形试验

12.7.4 采用千分表架试验时，标距一般为试件高度的一半，位于试件中部。可以根据试件高度大小和设备条件作适当调整。

12.7.5 本试验用两种方法计算岩石弹性模量和泊松比，即岩石平均弹性模量与岩石割线弹性模量及相对应的泊松比。根据需要可以确定任何应力下的岩石弹性模量和泊松比。岩石弹性模量值取 3 位有效数字是针对科学计数法而言。

12.8 直剪试验

12.8.5 预定的法向应力一般是指工程设计应力。因此法向应力的选取，一般根据工程设计应力（或工程设计压力）、岩石或岩体的强度、岩体的应力状态以及设备的精度和出力等确定。

12.8.8 当剪切位移量不大时，剪切面积可直接采用试件剪切面积，当剪切位移量过大而影响计算精度时，采用最终的重叠剪切面积。确定剪切阶段特征点时，现在常用的有比例极限、屈服极限、峰值强度、摩擦强度，在提供抗剪强度参数时，均需提供抗剪断的峰值强度参数值。

计算剪切荷载时需减去滚轴排的摩阻力。
